



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

أطروحة دكتوراه الطور الثالث

مجال: علوم المادة

شعبة: الفيزياء

تخصص فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

مقدمة من طرف الطالبة: سعادة ياسمين

بعنوان:

# دراسة تأثير مختلف أنواع التهجين على أداء المقطر الشمسي في منطقة ورقلة

يوم: 2026/02/9 أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ	ستو نور الدين
مناقشا	جامعة ورقلة	أستاذ	بشكي جمال
مناقشا	جامعة ورقلة	أستاذ	صايفي ندية
مناقشا	جامعة الوادي	أستاذ	عطية عبد المالك
مناقشا	جامعة الوادي	أستاذ محاضر أ	منصر نور الدين
مؤطر	جامعة ورقلة	أستاذ	بن منين جمال
مساعدة مؤطر	المدرسة العليا للأساتذة	أستاذ محاضر أ	قريشي زينب

السنة الجامعية : 2026/2025

# الاهداء

إلى من غرسوا في حب العلم،  
إلى من سهروا لأجلي، وشجعوني في كل مراحل حياتي...

إلى والديّ العزيزين،  
نبض قلبي، وسندي في هذه الدنيا...  
لكما كل الفضل بعد الله فيما أنا عليه اليوم، فأنتي لي أن أوفيكما حقكما؟  
أسأل الله أن يحفظكما ويطيل في عمركما.

إلى إخوتي وأخواتي،  
أنتم عائلتي الحنونة التي كانت تضيء دربي كلما تعثرت.

إلى زوجي الغالي،  
رفيق دربي، ومصدر قوتي،  
لك شكري الخالص على صبرك، دعمك، ومؤازرتك لي في كل لحظة،  
كنت نعم الشريك والمعلم والملمهم... فلك مني كل الامتنان والحب.

إلى أساتذتي ومؤطريّ،  
لكم الفضل في توجيهي وإرشادي،  
شكراً لصبركم، لعلمكم، ولثقتكم فيّ.

إلى كل من آمن بي، وساندني بكلمة أو دعاء،  
أهديكم ثمرة هذا الجهد... فأنتم شركاء النجاح.

# شكروعرفان

قبل كل شيء، أحمد الله سبحانه وتعالى، القادر على كل شيء، الذي أنعم عليّ بالقوة والعزيمة والصبر لإتمام هذا العمل العلمي، ووفقي لإكمال مسيرتي البحثية.

أتوجّه بأسمى عبارات الشكر والتقدير والعرفان إلى أستاذي المشرف الأستاذ البروفسور بن منين جمال، الذي كان نعم الموجّه والداعم، حيث لم يبخل عليّ بوقته الثمين، وتوجيهاته السديدة، وملاحظاته القيّمة طيلة مراحل إعداد هذه الأطروحة، رغم مسؤولياته الأكاديمية الجسيمة. فله مني خالص الشكر وجزيل الامتنان، وأتقدّم بجزيل الشكر والامتنان إلى المساعدة في الإشراف الأستاذة قريشي زينب، على متابعتها المستمرة، وتعاونها المثمر.

كما أتقدّم بجزيل الشكر والامتنان إلى الأستاذ البروفيسور ستو نورالدين، أستاذ بجامعة قاصدي مرياح ورقلة، لتفضّله بترؤس لجنة مناقشة هذه الأطروحة، وهو ما اعتبره شرفاً كبيراً لي.

ولا يفوتني أن أعبّر عن تقديري العميق وامتناني الكبير لكل من:

الأستاذ بشكي جمال ، أستاذ بجامعة قاصدي مرياح ورقلة،

والأستاذة صايبي ندية، أستاذة بجامعة قاصدي مرياح ورقلة،

والأستاذ عطية عبد المالك، أستاذ بجامعة حمه لخضر الوادي،

والأستاذ منصر نورالدين، أستاذ محاضر بجامعة حمه لخضر الوادي،

على اهتمامهم بعملهم العلمي، وتشريفهم لي بقبول المشاركة في لجنة المناقشة وإثرائهم هذا العمل بملاحظاتهم وتوجيهاتهم القيّمة.

وفي الختام، أتقدّم بأصدق عبارات الشكر والعرفان إلى كل من ساهم، من قريب أو بعيد، في إنجاز هذه

الأطروحة، وساعدني بالنصيحة أو التوجيه أو التشجيع. فجزاهم الله جميعاً خير الجزاء

# الفهرس

I	..... الاهداء
II	..... شكر وعرفان
III	..... الفهرس
VII	..... قائمة الأشكال
IX	..... قائمة الجداول
X	..... قائمة الرموز
1	..... المقدمة العامة
4	..... الفصل 1: المراجعة الأدبية لتقنيات المقطرات الشمسية والتهجين
5	..... 1-1 المقدمة
5	..... 1-2 مفاهيم أساسية حول تحلية المياه
5	..... 1-2-1 تعريف تحلية المياه وأنواعها
9	..... 1-3 المقطر الشمسي: المبدأ والتصميم
9	..... 1-3-1 تاريخ ومبدأ عمل المقطر الشمسي
10	..... 2-3-1 أنواع المقطرات الشمسية
15	..... 1-4 العوامل المؤثرة على أداء المقطر الشمسي
16	..... 1-4-1 العوامل المناخية
17	..... 2-4-1 العوامل التصميمية
17	..... 3-4-1 العوامل التشغيلية
18	..... 5-1 تحسين أداء المقطر الشمسي
19	..... 1-5-1 تقنيات التبخير
24	..... 2-5-1 تقنيات التكثيف
25	..... 6-1 نظام التقطير الشمسي الهجين متعدد التقنيات
28	..... 7-1 الخاتمة

## الفصل 2: منهج تحليلي رقمي لتقييم الأداء والاستدامة في المقطرات الشمسية..... 29

1-2 المقدمة.....	30
2-2 التحليل الشامل لأداء المقطر الشمسي.....	30
2-2-1 المعايير الأساسية للأداء.....	30
2-2-2 منهجية التحليل التجريبي.....	32
3-2 نظام الرصد الألي باستخدام الأردوينو.....	33
2-3-1 تصميم منظومة القياس الإلكترونية.....	33
2-3-2 الدوائر الإلكترونية وبروتوكولات الاتصال.....	42
2-3-3 معالجة البيانات وتصحيح الأخطاء:.....	44
2-4 تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التحسين.....	45
2-4-1 نماذج تنبؤ الأداء.....	45
2-4-2 أنظمة التحكم الذكية:.....	46
5-2 التحليل الاقتصادي والاستدامة.....	50
1-5-2 التقييم الاقتصادي:.....	50
2-5-2 تحليل الاستدامة:.....	52
2-5-3 التحليل البيئي (Environmental analysis).....	54
6-2 الخاتمة.....	55

## الفصل 3: ا لدراسة التجريبية لأداء المقطر الشمسي..... 56

1-3 المقدمة.....	57
2-3 منطقة الدراسة.....	57
3-3 التجربة الأولى: دراسة تأثير اللوحة المعدنية الداخلية.....	58
1-3-3 المنهجية التجريبية.....	58
3-3-2 أجهزة القياس والمعايير التجريبية.....	60
3-3-3 النتائج والمناقشات.....	62
4-3-3 المقارنة مع الدراسات السابقة.....	74

75	5-3-3 الخلاصة النهائية للتجربة .....
76	4-3 التجربة الثانية: تأثير الحرارة الجوفية على المقطر الشمسي .....
76	1-4-3 إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر .....
78	3-4-2 المنهجية .....
79	3-4-3 نظرة عامة على النظام .....
81	4-4-3 الاعداد التجريبي .....
83	5-4-3 معايرة المستشعرات .....
84	6-4-3 تحليل النتائج .....
100	7-4-3 خلاصة التجربة الثانية .....
101	5-3 الخاتمة .....
<b>103</b>	<b>الفصل 4: تحليل أداء المقطر الشمسي باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي .....</b>
104	1-4 المقدمة .....
104	4-2 وصف البيانات والنتائج التجريبية .....
104	3-4 منهجية النمذجة والتقييم .....
106	1-3-4 الانحدار الخطي (Linear Regression - LR) .....
107	2-3-4 شجرة القرار (Decision tree - DT) .....
107	3-3-4 الشبكة العصبية متعدد الطبقات (Multilayer Perceptron - MLP) .....
107	4-3-4 الغابة العشوائية (Random Forest - RF) .....
108	5-3-4 آلة المتجهات الداعمة (Support vector machine - SVM) .....
108	4-4 تطبيق نماذج التعلم الآلي لتحليل وتقييم أداء المقطر الشمسي اعتمادًا على النتائج التجريبية (تطبيق نماذج التعلم الآلي على البيانات التجريبية للمقطر الشمسي) .....
108	4-4-1 المقطر الأول .....
112	4-4-1 المقطر الثاني .....
116	4-4-2 المقطر الثالث .....
120	3-4-4 المقطر الرابع .....
124	4-4-4 المقطر الخامس .....

128	.....	5-4 مقارنة بين المقطرات الخمسة
129	.....	4-6 المقارنة مع أعمال سابقة
131	.....	7-4 خاتمة
132	.....	الخاتمة العامة
135	.....	قائمة المراجع
151	.....	الملحق
161	.....	الملخص

# قائمة الأشكال

- الشكل 1-1: عملية التناضح العكسي (D. Singh et al., 2023).....6
- الشكل 2-1: مخطط لإعداد ED بثلاث حجرات (Arana Juve et al., 2022).....7
- الشكل 3-1: عملية التقطير متعدد المراحل (D. Singh et al., 2023).....8
- الشكل 4-1: عملية التقطير متعدد التأثير (Madhuri et al., 2025).....8
- الشكل 5-1: مبدأ عمل المقطر الشمسي.....9
- الشكل 6-1: مكونات المقطر الشمسي أحادي الميل (Saada et al., 2025).....10
- الشكل 7-1: مخطط لنموذج التقطير الشمسي وتصميماته المختلفة.....11
- الشكل 8-1: المقطر الشمسي أحادي الميل (Chemkhi & Madiouli, 2022).....12
- الشكل 9-1: المقطر الشمسي ثنائي الميل (H. Hassan et al., 2019).....12
- الشكل 10-1: المقطر الشمسي الهرمي (Alawee et al., 2021).....13
- الشكل 11-1: المقطر الشمسي النصف كروي (Kabeel et al., 2023).....14
- الشكل 12-1: المقطر الشمسي الأنبوبي (Abdullah et al., 2025).....14
- الشكل 13-1: المقطر الشمسي المخروطي (Kabeel et al., 2024).....15
- الشكل 14-1: العوامل المؤثرة على أداء المقطر الشمسي.....16
- الشكل 15-1: طرق تحسين أداء المقطر الشمسي.....19
- الشكل 1-2: انواع الاردوينو: أ- Arduino UNO ب- Arduino Nano ج- Arduino Mega 2560 د- Arduino Due.....35
- الشكل 2-2: مكونات Arduino Mega (Arduino, 2025b).....37
- الشكل 3-2: تقسيمات التعلم الالي (Gayatri et al., 2022).....46
- الشكل 1-3: خريطة الجزائر وموقع ورقلة.....57
- الشكل 2-3: رسم تخطيطي للمقطر الشمسي التقليدي.....59
- الشكل 3-3: رسم تخطيطي للمقطر الشمسي المحسن.....60
- الشكل 4-3: اجهزة القياس المستعملة في التجربة الأولى.....61
- الشكل 5-3: توزيع المزدوجات الحرارية في كلا المقطرين.....62
- الشكل 6-3: تغيرات شدة الاشعاع الشمسي ، درجة حرارة الجو و سرعة الرياح.....63
- الشكل 7-3: تغيرات درجات حرارة الماء والزجاج والصفیحة المعدنية للمقطر الشمسي التقليدي والمحسن.....64
- الشكل 8-3: تغيرات الانتاجية الساعية.....66
- الشكل 9-3: تغيرات الانتاجية التراكمية بدلالة الزمن.....67
- الشكل 10-3: نسبة التحسن التراكمي الساعي.....67
- الشكل 11-3: مخطط الكفاءة اليومية.....68
- الشكل 12-3: تغيرات exergy efficiency بلالة الزمن.....69
- الشكل 13-3: تغيرات Exergy Destruction بدلالة الزمن.....70
- الشكل 14-3: منحى التكاليف والارباح لكل مقطر لمدة 10 سنوات.....73
- الشكل 15-3: مقارنة إنتاجية المقطر الشمسي في الدراسة الحالية مع دراسات سابقة.....74

الشكل 3-16: (يمين) تدرج الحرارة الأرضية لمنطقة الدراسة، (يسار) موقع وتركيبه المواد الكيميائية للموارد الحرارية الأرضية في المنطقة (Ouali et al., 2018).....	77
الشكل 3-17: المنهجية المتبعة في الدراسة.....	79
الشكل 3-18: الأعداد التجريبي.....	80
الشكل 3-19: مخطط ربط الحساسات بلوحة اوردوينو.....	81
الشكل 3-20: مخطط للنظام التجريبي.....	82
الشكل 3-21: خطوات معايرة الترموكوبل.....	83
الشكل 3-22: التغيرات الساعية في درجة حرارة المحيط والاشعاع الشمسي وسرعة الرياح خلال يومي 30 و 31 أكتوبر 2024 ...	84
الشكل 3-23: التغيرات الساعية لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي و المياه المالحة للمقطرات الثلاثة ليومي 30 و 31 أكتوبر 2024 .	85
الشكل 3-24: التغيرات الساعية واليومية لانتاجية الماء المقطر للمقطرات الثلاثة خلال 30 و 31 أكتوبر 2024.....	86
الشكل 3-25: تغيرات energy/exergy efficiency واليومية والساعية خلال 30 و 31 أكتوبر 2024 لكل المقطرات الثلاثة.....	88
الشكل 3-26: التغيرات الساعية في درجة حرارة المحيط والاشعاع الشمسي وسرعة الرياح خلال 6 و 7 يناير 2025.....	89
الشكل 3-27: التغيرات الساعية لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي والماء المالح لكل المقطرات على مدار 6 و 7 جانفي 2025.....	90
الشكل 3-28: التغيرات اليومية والساعية للانتاجية على مدار 6 و 7 يناير 2025.....	91
الشكل 3-29: تغيرات energy/exergy efficiency والساعية واليومية خلال ايام 6 و 7 يناير 2025.....	92
الشكل 3-30: التغيرات الساعية لدرجة حرارة المحيط، شدة الاشعاع الشمسي وسرعة الريح خلال يوم 22 يناير 2025.....	93
الشكل 3-31: التغيرات الساعية لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي والماء المالح لكل المقطرات الثلاثة خلال يوم 22 يناير 2025.....	94
الشكل 3-32: التغيرات الساعية واليومية في الانتاجية لكل المقطرات الثلاثة على مدار يوم 22 يناير 2025.....	95
الشكل 3-33: تغيرات energy/exergy efficiency والساعية واليومية لكل المقطرات خلال 22 يناير 2025.....	96
الشكل 3-34: تقدير الأداء السنوي بناء على الظروف المناخية الفعلية.....	100
الشكل 4-1: خريطة الارتباط الخاصة بمعلمات اداء المقطر التقليدي للتجربة الاولى.....	109
الشكل 4-2: منحني التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية دعم المتجهات SVM.....	111
الشكل 4-3: منحني التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي.....	112
الشكل 4-4: خريطة الارتباط الخاصة بمعلمات اداء المقطر المحسن للتجربة الاولى.....	113
الشكل 4-5: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية دعم المتجهات SVM.....	115
الشكل 4-6: منحني التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الثاني.....	116
الشكل 4-7: خريطة ارتباط معلمات أداء المقطر التقليدي للتجربة الثانية.....	117
الشكل 4-8: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية الشبكة العصبية متعدد الطبقات (MLP).....	119
الشكل 4-9: منحني التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الثالث.....	120
الشكل 4-10: خريطة ارتباط معلمات أداء المقطر المحسن الاول في التجربة الثانية.....	121
الشكل 4-11: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية شجرة القرار DT.....	123
الشكل 4-12: منحني التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الرابع.....	124
الشكل 4-13: خريطة ارتباط معلمات أداء المقطر المحسن الثاني في التجربة الثانية.....	125
الشكل 4-14: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية RF.....	127
الشكل 4-15: منحني التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الخامس.....	128

# قائمة الجداول

الجدول 1-1: مراجعة أدبية حول تحسين أداء المقطر الشمسي.....	26
الجدول 1-2: ملخص لوحات Arduino وتطبيقاتها (Kondaveeti et al., 2021).....	35
الجدول 2-2: مختلف أنواع الحساسات.....	40
الجدول 3-2: مقارنة بين دراسات حديثة حول استخدام نماذج التعلم الآلي في التنبؤ بأداء المقطرات الشمسية.....	49
الجدول 1-3: خصائص أجهزة القياس.....	61
الجدول 2-3: مقارنة التكاليف الأولية لمكونات المقطرين الشمسيين التقليدي والمحسن.....	72
الجدول 3-3: التحليل الاقتصادي لتكلفة إنتاج لتر واحد من الماء المقطر.....	72
الجدول 4-3: المقارنة الاقتصادية والإنتاجية بين وحدتين من المقطر التقليدي ووحدة من المقطر المحسن.....	73
الجدول 5-3: الخصائص الهيدروكيميائية لعينات المياه الجوفية بمناطق مختلفة من الجنوب الجزائري (Ouali et al., 2018).....	77
الجدول 6-3: الخصائص الحرارية والجيولوجية لبعض الآبار الجوفية المختارة في منطقة الدراسة.....	78
الجدول 7-3: التحليل الاقتصادي وتحليل Exergo-Economic للمقطرات الشمسية تحت كل السيناريوهات.....	97
الجدول 8-3: تحليل فترة الاسترداد للمقطرات الشمسية تحت سيناريوهات تشغيل مختلفة:.....	99
الجدول 1-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي.....	110
الجدول 2-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الثاني.....	114
الجدول 3-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي الثالث.....	118
الجدول 4-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي.....	122
الجدول 5-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي.....	126
الجدول 6-4: مقارنة بين النماذج الأحسن للمقطرات الخمس.....	129
الجدول 7-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي في التنبؤ بين الدراسة الحالية ودراسة سابقة.....	130

# قائمة الرموز

الرموز	المصطلحات	الوحدة
$\dot{m}_w$	الانتاجية	لتر/م <sup>2</sup> يوم
$A_s$	المساحة الكلية للمقطر	م <sup>2</sup>
$L_v$	تمثل الحرارة الكامنة لتبخير الماء	لتر/م <sup>2</sup> يوم
$t$	الزمن	اليوم
$T_{amb}$	درجة حرارة الجو	م°
$T_{gi}$	درجة حرارة الزجاج الخارجي	م°
$T_s$	درجة حرارة الشمس	م°
$T_w$	درجة حرارة الماء	م°
$m_w$	كتلة الماء المقطر	لتر أو كغ
$I$	شدة الاشعاع الشمسي	واط/م <sup>2</sup>
$\eta$	كفاءة الطاقة	
$\eta_{ex}$	كفاءة الاكسيري	

الاختصارات	المصطلحات	الوحدة
AMC	تكلفة الصيانة السنوية	الدولار
AMC	تكلفة الصيانة السنوية	الدولار
ASV	قيمة الإنقاذ السنوية	
ASV	القيمة السنوية للإنقاذ	الدولار
CFD	ديناميكا الموائع الحسابية	
CPL	تكلفة إنتاج المياه العذبة	دولار/لتر
CRF	معامل استرداد رأس المال	
DT	شجرة القرار	
EPF	عامل إنتاج الطاقة	
EPT	فترة استرداد الطاقة	
FAC	التكلفة السنوية الثابتة	الدولار
i	الفائدة السنوية	
ISS	المقطر الشمسي المحسن بصفيحة معدنية	
LR	الانحدار الخطي	
M	متوسط الإنتاج السنوي	الكيلوجرام/م <sup>2</sup> سنة
MAE	متوسط الخطأ المطلق	
MLP	الشبكة العصبية متعدد الطبقات	
MSS-1	المقطر الشمسي المحسن بالمياه الجوفية	
MSS-2	المقطر الشمسي المحسن بتبريد الغطاء الزجاجي	
n	عدد سنوات عمر النظام	
Ps	التكلفة الإجمالية لجهاز التقطير	الدولار
R	معامل الارتباط	

	نسبة الخطأ المطلق	RAE
	الغابة العشوائية	RF
	الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ	RMSE
	نسبة الجذر التربيعي للخطأ	RRSE
	معامل صندوق الاستهلاك	SFF
الدولار	قيمة الإنقاذ	SV
	ألة المتجهات الداعة	SVM
الدولار	التكلفة السنوية الإجمالية	TAC
	المقطر الشمسي التقليدي	TSS

# المقدمة العامة

# المقدمة العامة

تُعتبر المياه العذبة من الموارد الحيوية الأساسية لاستمرار الحياة والتنمية الاقتصادية والاجتماعية. غير أنّ العالم يشهد في العقود الأخيرة أزمة متصاعدة نتيجة التزايد المستمر في الطلب على المياه، مقابل محدودية الموارد التقليدية وندرتها، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة. وقد فاقمت التغيرات المناخية من حدة هذه الأزمة، من خلال تناقص معدلات التساقط المطري، وارتفاع درجات الحرارة، وزيادة معدلات التبخر، ما جعل مشكلة ندرة المياه تمثل تحديًا استراتيجيًا للبشرية. وتشير تقارير المنظمات الدولية إلى أنّ أكثر من 2 مليار شخص حول العالم يعانون من نقص في المياه الصالحة للشرب (UNICEF and WHO, 2023)، كما أنّ نحو 10% من سكان العالم (حوالي 720 مليون شخص) (UN-Water, 2025) يعيشون في مناطق تعاني من إجهاد المياه و هو ما يفرض البحث عن حلول بديلة مستدامة وفعالة. من جهة أخرى، يشير مؤشر الضغط المائي العالمي إلى أن معدل الضغط المائي العالمي بلغ نحو 18.6% في 2021، (UN-Water, 2024) وهو اتجاه تصاعدي مقارنة بالسنوات السابقة، مما يعكس تزايد ضغوط الطلب على الموارد المائية المتاحة. وتتوقع منظمة الأغذية والزراعة (FAO) أن يعيش ما يقرب من 1.8 مليار شخص بحلول عام 2025 في دول أو مناطق تعاني من ندرة مائية "مطلقة" (أدنى من 500 متر<sup>3</sup>/سنة للفرد) (FAO, 2025)، مما يهدد الأمن الغذائي والتنمية الإقليمية.

في هذا الإطار، برزت تقنيات تحلية المياه كخيار استراتيجي لمعالجة هذه المعضلة، إذ تسمح بتحويل المياه المالحة أو قليلة الملوحة إلى مياه عذبة قابلة للاستعمال المنزلي والزراعي والصناعي. غير أنّ معظم تقنيات التحلية الصناعية (كالتحلية الحرارية أو الغشائية) تظل مكلفة من حيث الاستثمار الأولي وكثافة استهلاك الطاقة، ما يجعل انتشارها محدودًا في بعض الدول النامية. لهذا، أصبحت الحاجة ملحة إلى حلول تعتمد على الطاقات المتجددة، خصوصًا الطاقة الشمسية التي تُعد من المصادر المتوفرة بكثرة في المناطق الصحراوية.

يُعد التقطير الشمسي أحد أقدم وأبسط التقنيات المستعملة في تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية. وتقوم فكرته على محاكاة الدورة الطبيعية للماء من خلال التبخر والتكاثف داخل جهاز معزول يُعرف بـ "المقطر الشمسي". ورغم بساطة هذا الجهاز وصداقته للبيئة وتكلفته المنخفضة، إلا أنّه يعاني من عائق رئيس يتمثل في ضعف الإنتاجية والكفاءة الحرارية، مما يحد من إمكانية تطبيقه على نطاق واسع لتلبية الحاجيات المتزايدة من المياه العذبة. ومن هنا جاءت ضرورة البحث عن استراتيجيات لتحسين أداء المقطرات الشمسية ورفع مردوديتها. لقد أظهرت الدراسات الحديثة أنّ تحسين أداء المقطر الشمسي يمكن تحقيقه عبر تقنيات التهجين، التي تقوم على دمج المقطر التقليدي مع أنظمة مساعدة أو مكملية، مثل: المجمعات الشمسية الحرارية، المواد متغيرة الطور لتخزين الطاقة، الموائع النانوية والمياه الجوفية لتعزيز انتقال الحرارة، أو أنظمة التبريد والتكثيف المختلفة. هذا الدمج يُساهم في رفع درجة حرارة مياه الحوض وتسريع التبخر من جهة، وتعزيز عملية

التكاثف من جهة أخرى، مما ينعكس مباشرة في زيادة إنتاجية المياه العذبة. وتكتسب هذه التحسينات أهمية إضافية في ظل التوجه العالمي نحو تقنيات منخفضة الانبعاثات، خاصة بعدما قدّرت دراسة نُشرت في مجلة Nature Climate Change انخفاضاً بنسبة 17% في الانبعاثات اليومية في أوائل أبريل 2020 بسبب جائحة كورونا نتيجة تراجع الأنشطة الصناعية وحركة النقل، وهو ما أبرز الأثر المباشر للأنشطة البشرية على البيئة والمناخ (Hale, 2020). ومع ذلك، يظل اختيار التقنية الأنسب مرتبطاً بالظروف المناخية المحلية، والتكلفة، وسهولة الصيانة. إلى جانب التحسينات التقنية، شهدت السنوات الأخيرة طفرة في مجال الذكاء الاصطناعي، حيث أثبتت فعاليتها في تحليل الأنظمة الطاقوية والتنبؤ بأدائها، أين توفر تقنيات التعلم الآلي أدوات قوية للتعامل مع البيانات التجريبية، واستخلاص نماذج قادرة على التنبؤ بإنتاجية المقطر بدقة عالية اعتماداً على متغيرات مناخية وتشغيلية مختلفة.

انطلاقاً من هذا السياق، تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة وتحليل تأثير تقنيات تهجين محددة على أداء المقطر الشمسي في منطقة ورقلة، التي تُعد من المناطق الصحراوية ذات المناخ الحار والجاف والغنية بالإشعاع الشمسي، لكنها تعاني من ندرة حادة في المياه العذبة. وتركّز الدراسة بشكل خاص على مقارنة تحسين أداء المقطر الشمسي من خلال التسخين الشمسي باستعمال صفيحة معدنية، واستغلال المياه الجوفية كمصدر حراري مساعد، إلى جانب دراسة تأثير تبريد الزجاج الخارجي على تعزيز عملية التكاثف. تستند هذه الأطروحة إلى إطار منهجي متكامل يجمع بين الدراسة النظرية والتجريبية، ويتمحور حول أربعة فصول رئيسية.

فيعرض الفصل الأول الأرضية النظرية للبحث، مبتدئاً بمفاهيم أساسية حول تحلية المياه وتقنياتها المتنوعة، ثم يتعمق في مبدأ عمل المقطر الشمسي وتطوره التاريخي، ليصل إلى تصنيف الأنماط المختلفة للمقطرات الشمسية. كما يحلل هذا الفصل العوامل المؤثرة على الأداء (مناخية، تصميمية، تشغيلية) ويستعرض بالتفصيل استراتيجيات التحسين الممكنة، سواء تلك المرتبطة بمرحلة التبخر أو تلك الخاصة بمرحلة التكثيف. ويختتم الفصل بعرض شامل لأهم الدراسات السابقة التي تناولت أنظمة التهجين متعددة التقنيات، محدداً الفجوة البحثية التي تسعى هذه الدراسة لسدها.

أما الفصل الثاني، فيتناول البنى المنهجية والتحليلية للبحث. فيبدأ بتحديد المعايير الأساسية لتقييم الأداء (الإنتاجية، energy، exergy). ثم ينتقل إلى وصف نظام القياس الذكي المطور باستخدام لوحة الأردوينو ومجموعة متكاملة من الحساسات (درجة الحرارة، الرطوبة، المسافة، التدفق) لرصد البيانات بدقة عالية. كما يستعرض الفصل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأداء وتحسينه، من خلال نماذج مثل الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) وخوارزميات التعلم الآلي. ويختتم الفصل بتحليل اقتصادي دقيق يشمل حساب تكلفة إنتاج اللتر الواحد وفترة استرداد الاستثمار، إلى جانب تحليل الاستدامة الذي يتضمن حساب البصمة الكربونية ومؤشر الاستدامة وفترة استرداد الطاقة.

في الفصل الثالث، يتم الانتقال إلى الجانب التطبيقي من خلال سلسلتين تجريبيتين ميدانيتين. تهدف التجربة الأولى إلى دراسة تأثير إضافة لوحة معدنية ماصة للإشعاع داخل المقطر، حيث تمت مقارنة أداء المقطر المحسن (ISS) مع المقطر التقليدي (TSS). بينما ركزت التجربة الثانية على تقييم تأثير تقنيتين هجينتين إضافيتين هما: دمج نظام محاكاة الطاقة الحرارية الأرضية عبر مبادل حراري (MSS-1) واستخدام نظام تبريد نشط للغطاء الزجاجي (MSS-2) وقد تم اختبار هذه النماذج تحت ثلاث سيناريوهات مناخية مختلفة (سواء صافية، تذبذب متقطع، رياح شديدة) لضمان شمول النتائج.

أخيراً، يقدم الفصل الرابع تحليلاً متقدماً للنتائج التجريبية باستخدام مجموعة من نماذج التعلم الآلي بهدف تطوير نماذج تنبؤية دقيقة لأداء الأنظمة الهجينة وتحديد العوامل الأكثر تأثيراً في كفاءتها.

الفصل 1: المراجعة الأدبية  
لتقنيات المقطرات الشمسية  
والتهجين

## 1-1 المقدمة

يتناول هذا الفصل الأسس النظرية التي يقوم عليها عمل المقطر الشمسي، بالإضافة إلى عرض وتحليل لأهم الدراسات السابقة في المجال، مع التركيز على تقنيات التهجين المختلفة التي استُخدمت بهدف تحسين الأداء الحراري والإنتاجية. كما يُبرز هذا الفصل الفجوات البحثية التي يسعى هذا العمل لسدّها، ويحدد موقع الدراسة الحالية وسط الأدبيات العلمية.

## 2-1 مفاهيم أساسية حول تحلية المياه

### 1-2-1 تعريف تحلية المياه وأنواعها

تحلية المياه هي عملية إزالة الأملاح والشوائب من المياه المالحة أو شبه المالحة بهدف الحصول على مياه عذبة، و مع تزايد الطلب العالمي على المياه العذبة وندرتها المتزايدة خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة، أصبحت تحلية المياه خيارًا استراتيجيًا لتلبية الحاجيات الأساسية للمجتمعات وقد برزت حتى الآن كواحدة من أهم الطرق العالمية لمعالجة وإنتاج مياه الشرب. ووفقًا للوكالة الدولية لتحلية المياه، يوجد ما يقرب من 22,000 محطة تحلية مياه حول العالم، بطاقة إجمالية يومية تبلغ حوالي 109.22 مليون متر مكعب. تتوزع هذه المحطات على 150 دولة، وتُوقَّر المياه لأكثر من 300 مليون شخص. تجدر الإشارة في هذه المرحلة إلى أن أكثر من 60% من طاقة تحلية المياه العالمية تتركز في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (Madhuri et al., 2025). يمكن تصنيف تقنيات التحلية بشكل عام إلى فئتين رئيسيتين:

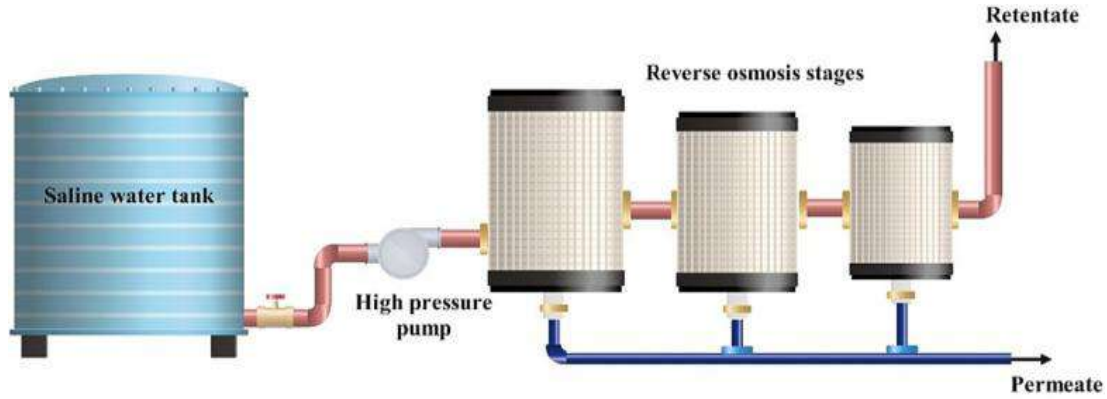
### 1-1-2-1 تقنيات غشائية: (Membrane Technologies)

تعتمد التقنيات الغشائية على استخدام أغشية نصف نفاذة تفصل بين الماء المالح والماء النقي، يتم دفع الماء عبر هذه الأغشية تحت ضغط مرتفع، مما يسمح للماء النقي بالمرور بينما يتم الاحتفاظ بالأملاح والشوائب على سطح الغشاء:

#### أ) التناضح العكسي (RO):

أكثر تقنيات الأغشية شيوعًا لتحلية المياه المالحة هي التناضح العكسي المدفوع بالضغط (RO). في هذه التقنية، يُطبق ضغط هيدروليكي على الجزء ذي التركيز الأعلى من الملح، مما يُجبر جزيئات الماء على الحركة عبر غشاء شبه نافذ في الجزء ذي التركيز الأقل من الملح. والنتيجة هي أن المادة المذابة (المحلول الملحي المركز) تُحتجز على الجانب المضغوط من الغشاء، بينما يُسمح للمذيب النقي (المياه العذبة) بالعبور على الجانب الآخر (Panagopoulos et al., 2019). يُعرض الشكل 1-1 الرسم التخطيطي النموذجي للتناضح العكسي في.

على الرغم من نجاحها التجاري، إلا أن قيود الملوحة في تقنية التناضح العكسي التقليدية تجعلها غير واعدة لمعالجة المحلول الملحي عالي المواد الصلبة الذائبة.



الشكل 1-1: عملية التناضح العكسي (D. Singh et al., 2023)

### ب) النانو ترشيح (NF)

تقنية النانو ترشيح (NF) تعتمد على استخدام أغشية دقيقة تحتوي على مسام نانوية بحجم يتراوح ما بين 1 إلى 10 نانومتر، وتتميز بقدرة قطع جزيئية تتراوح بين 300 إلى 500 دالتون (Da)، ما يجعلها فعالة في إزالة الجزيئات العضوية الصغيرة والأيونات متعددة التكافؤ. تُصنع هذه الأغشية من مواد بوليمرية شبه قابلة للنفاذ، تم اختيارها بعناية لتوفير خصائص فصل دقيقة ومحددة. يتم الفصل في عملية النانو ترشيح من خلال ثلاث آليات رئيسية متداخلة، وهي: الحمل الحراري، والانتشار، والتفاعلات الكهروستاتيكية، وتُوصف هذه الآليات ضمن نموذج المسام النانوية الفراغية المعروف باسم (Donnan Steric Pore Model - DSPM). وتُظهر الأغشية المستخدمة في هذه التقنية انتقائية عالية تجاه الأيونات، حيث ترفض ما يقارب 98% من الأيونات ثنائية التكافؤ مثل أيونات الكبريتات ( $SO_4^{2-}$ )، بينما تسمح بمرور نسبة كبيرة من الأيونات أحادية التكافؤ مثل كلوريد الصوديوم (NaCl)، إذ لا تتجاوز نسبة الرفض لها 50%. لذلك، تُعد النانو ترشيح تقنية فعالة في التطبيقات التي تتطلب إزالة الملوثات الكبيرة مع الاحتفاظ بالأملاح الأحادية الضرورية في المياه (Saavedra et al., 2021).

### ج) التحليل الكهربائي (ED)

تعتمد تقنية التحليل الكهربائي الغشائي (Electrodialysis - ED) في تحلية المياه على مبدأ هجرة الأيونات الموجبة (Cations) والأيونات السالبة (Anions) من المياه المالحة عبر أغشية تبادل أيوني انتقائية، وذلك تحت تأثير مجال كهربائي (Electric Field).

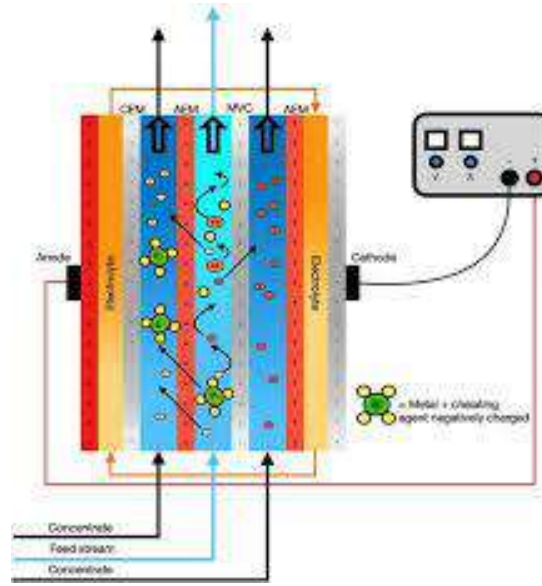
تُستخدم في هذه التقنية نوعان من الأغشية:

-غشاء تبادل الكاتيونات (Cation Exchange Membrane - CEM)، وهو مشحون سالبًا ويسمح بمرور

الأيونات الموجبة مثل الصوديوم (+Na).

-غشاء تبادل الأنيونات (Anion Exchange Membrane - AEM) ، وهو مشحون إيجابيًا ويسمح بمرور الأيونات السالبة مثل الكلوريد. (-Cl)

عند تطبيق المجال الكهربائي، تتحرك الأيونات المذابة في الماء (الأملاح) نحو الأقطاب الكهربائية، فتمر عبر الأغشية باتجاه الغرف المخصصة لتركيز الأملاح، بينما يُحتجز الماء المنزوع الأملاح في غرف أخرى كما هو موضح في الشكل 2-1. تسمح هذه العملية بإزالة الأيونات الذائبة من المياه المالحة أو قليلة الملوحة، مما يؤدي إلى إنتاج ماء منخفض الملوحة مناسب للشرب أو الاستخدام الزراعي والصناعي (Arana Juve et al., 2022).



الشكل 2-1: مخطط لإعداد ED بثلاث حجرات (Arana Juve et al., 2022)

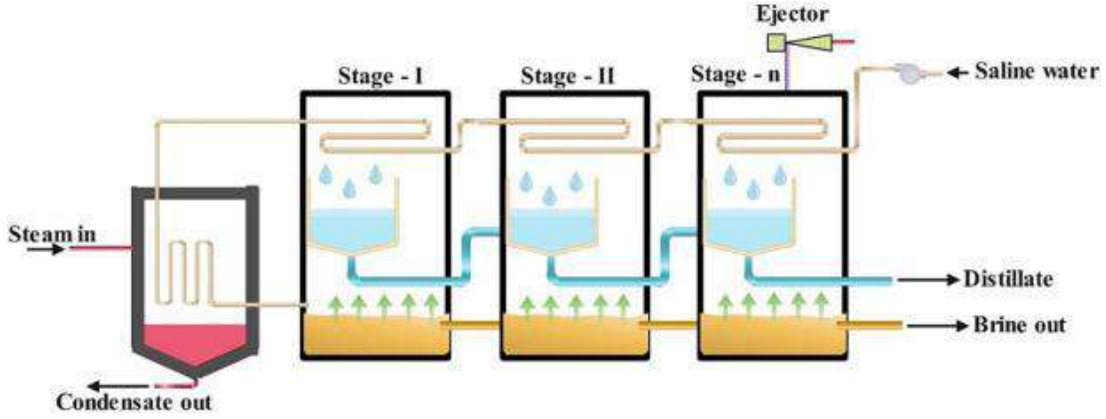
### 2-1-2-1 تقنيات حرارية (Thermal Desalination) :

تعتمد التقنيات الحرارية على مبادئ التبخير والتكثيف، إذ تُحوّل المياه المالحة إلى بخار، ومن ثم يتم تكثيفه ليُصبح ماءً نقيًا. وتختلف هذه التقنيات من حيث طريقة تحقيق التبخير وعدد المراحل التي تمر بها المياه:

#### أ) التقطير متعدد المراحل (MSF)

يعتمد التقطير متعدد المراحل على تسخين الماء إلى درجة غليان منخفضة، ثم تمريره عبر مجموعة من الأنابيب والأنظمة التي تحتوي على عدة مراحل منخفضة الضغط. كلما انتقل الماء من مرحلة إلى أخرى، يتم تقليص الضغط بشكل تدريجي، مما يسمح له بالتبخير عند درجات حرارة أقل. يتكثف البخار في كل مرحلة ويتم

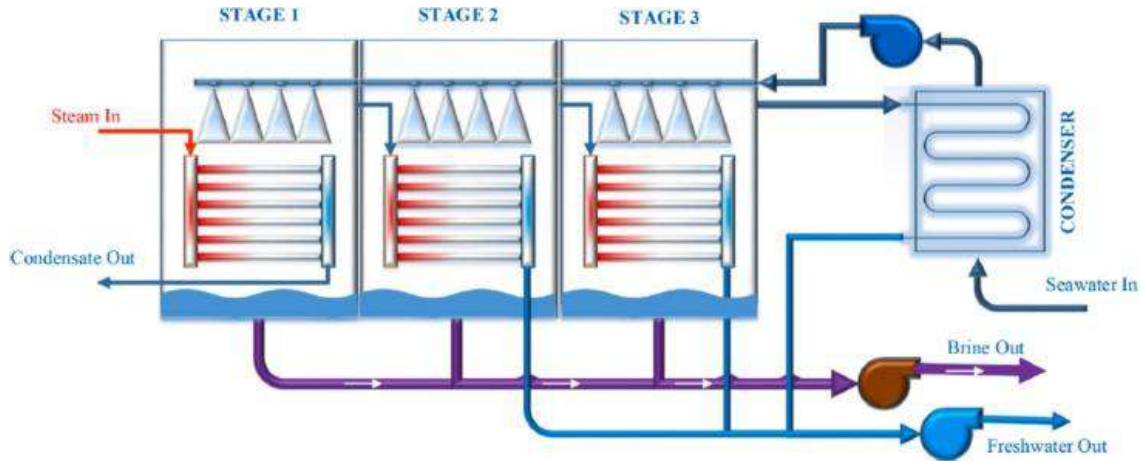
جمعه، كما يوضحها الشكل 1-3. تتميز هذه العملية بقدرتها على تحلية كميات كبيرة من المياه وفي المقابل تستهلك طاقة كبيرة وأيضاً تكلفة البناء والصيانة مرتفعة (D. Singh et al., 2023).



الشكل 1-3: عملية التقطير متعدد المراحل (D. Singh et al., 2023)

### ب) التقطير متعدد التأثير (MED)

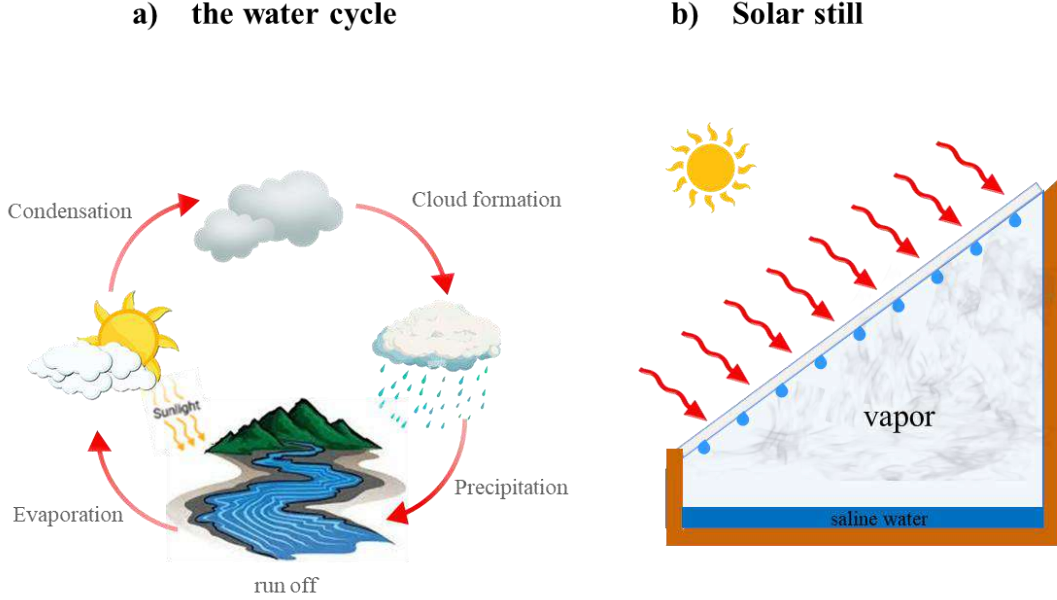
كما يشير الاسم، تتضمن عملية التحلل متعدد التأثير (MED) تأثيرات تبخر وتكثيف متعددة أثناء تشغيلها عند درجات حرارة وضغوط مختلفة، كما هو موضح في الشكل 1-4، يُدخل البخار الساخن إلى التأثير الأولي من مصدر حرارة خارجي عبر أنبوب. عند رش مياه البحر على الأنبوب، يمتص الحرارة من البخار، مما يؤدي إلى تبخره. ثم يُوجه البخار الناتج عن تبخر الماء وغليان المحلول الملحي إلى المرحلة الثانية، حيث تحدث عملية التبخر والتكثيف، مما ينتج عنه إنتاج المياه العذبة. تستمر دورة نقل البخار والمحلول الملحي بين العمليات عند درجات حرارة وضغوط منخفضة تدريجيًا، حتى الوصول إلى التأثير النهائي (Al-Obaidi et al., 2022).



الشكل 1-4: عملية التقطير متعدد التأثير (Madhuri et al., 2025)

### ج) التقطير الشمسي (Solar Distillation)

يعتمد التقطير الشمسي على محاكاة العملية الطبيعية للدورة الهيدرولوجية الشكل 5-1؛ إذ يتم تسخين المياه بواسطة الطاقة الشمسية داخل وحدة معزولة، مما يؤدي إلى تبخرها وتكثف البخار على سطح بارد (عادةً غطاء زجاجي أو بلاستيكي)، ثم يُجمع الماء المقطر.

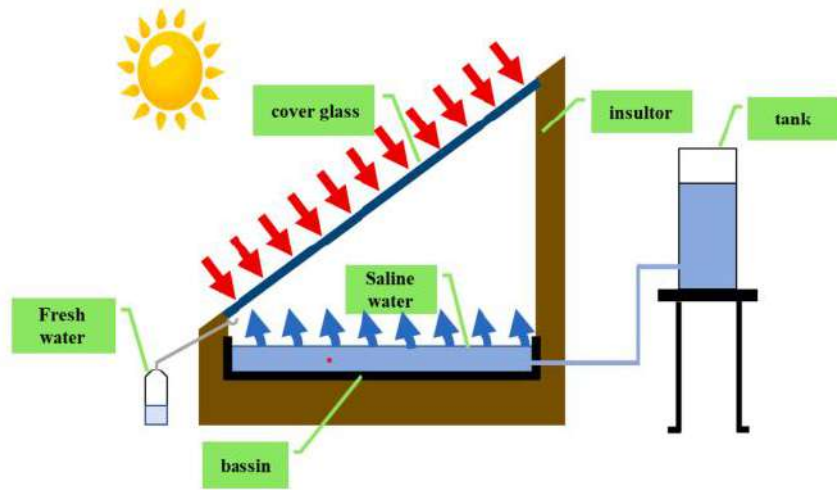


الشكل 5-1: مبدأ عمل المقطر الشمسي

### 3-1 المقطر الشمسي: المبدأ والتصميم

#### 1-3-1 تاريخ ومبدأ عمل المقطر الشمسي

تعد تحلية المياه بالطاقة الشمسية حلاً مبتكراً وصديقاً للبيئة لتحويل المياه المالحة إلى مياه صالحة للشرب، عبر استخدام جهاز يسمى بالمقطر الشمسي، اين تم تسجيل أول استخدام للمقطرات الشمسية على يد الكيميائيين العرب عام 1551. وتوالت الإشارات إلى هذه التقنية لاحقاً، حيث تناولها ديلا بورتا في عام 1589، ثم لافوازييه في عام 1862، وتبعه ماوشو في عام 1869. وفي عام 1872، أنشأ المهندس السويدي تشارلز ويلسون أول محطة تقطير شمسي كبيرة الحجم، مستخدماً تقنية الحوض الواحد التقليدية. وقد أُقيمت هذه المحطة في تشيلي، وكان هدفها الأساسي توفير مياه نظيفة وصالحة للشرب لعمال المناجم وسكان المناطق المحيطة (Jodah et al., 2024).

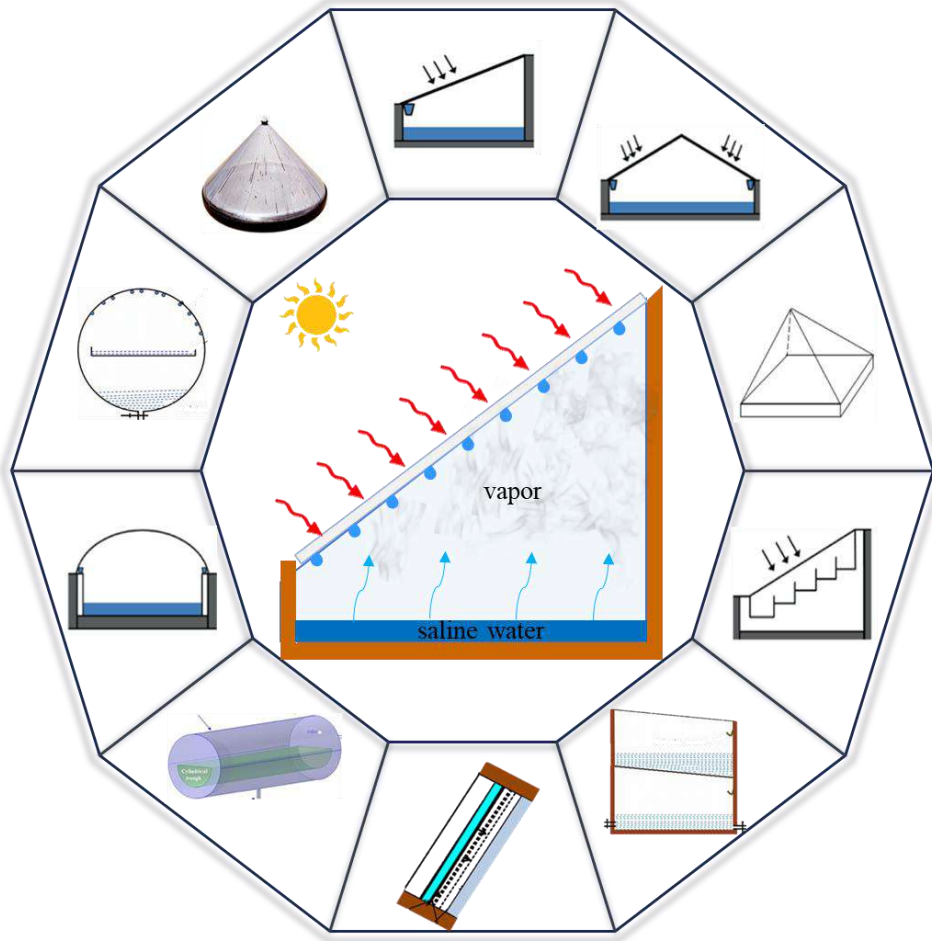


الشكل 1-6: مكونات المقطر الشمسي أحادي الميل (Saada et al., 2025)

يتكون جهاز التقطير الشمسي من حوض يحتوي على كمية من المياه المالحة ويُغطى بغطاء شفاف، غالبًا من الزجاج، يسمح بمرور أشعة الشمس. يمتص الماء داخل الحوض الإشعاع الشمسي، مما يؤدي إلى تسخينه وتبخره. ثم يتكثف البخار الناتج على السطح الداخلي للغطاء، الذي يكون أبرد نسبيًا، ويتحول إلى قطرات من الماء النقي تُجمع عبر مزاريب خاصة. تُعزل جوانب الحوض حراريًا لتحسين كفاءة امتصاص الحرارة، بينما يُترك الغطاء العلوي شفافًا للسماح بدخول الإشعاع (الشكل 1-6). وتُعرف هذه التقنية باسم نظام التقطير الشمسي، وتُستخدم في تحلية المياه المالحة بطريقة بسيطة وفعالة بيئيًا، مع مزايا تشمل انخفاض التكلفة وسهولة التشغيل والصيانة. (Gude & Fthenakis, 2020; Shi et al., 2020)

### 2-3-1 أنواع المقطرات الشمسية

تُعد المقطرات الشمسية من التقنيات البسيطة والفعالة لتحلية المياه، خاصة في المناطق التي تعاني من شح الموارد المائية وتوافر الإشعاع الشمسي. وتتنوع تصاميم المقطرات الشمسية بشكل كبير لتلبية احتياجات الاستخدام المختلفة، سواء من حيث السعة، الكفاءة، أو سهولة التصنيع والصيانة. يُمكن تصنيف المقطرات الشمسية وفقاً لعدة معايير، أهمها: شكل التصميم (أحادي الميل، هرمي، مخروطي...)، عدد المراحل أو وحدات التقطير (الشكل 1-7). في هذه الورقة، سنستعرض أشهر هذه الأنواع وأكثرها بساطة من حيث التركيب والاعتماد، مع التركيز على النماذج المستخدمة على نطاق واسع.



الشكل 1-7: مخطط لنموذج التقطير الشمسي وتصميماته المختلفة

### 1-2-3-1 المقطرات أحادي الميل

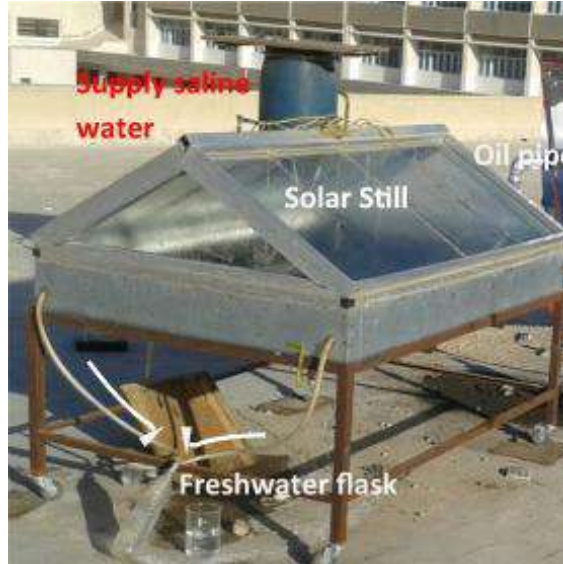
يُعد المقطر الشمسي أحادي الميل من أبسط وأكثر أنواع المقطرات الشمسية شيوعًا. يتميز هذا النوع بغطائه الزجاجي المائل في اتجاه واحد، والذي يسمح لأشعة الشمس بالنفاذ إلى الداخل وتسخين المياه، مما يؤدي إلى تبخرها. يتكاثف البخار على السطح الداخلي للزجاج المائل، ومن ثم ينزل على شكل قطرات ماء نقي إلى قناة تجميع موضوعة في أسفل الجهة المنحدرة كما يوضحه الشكل 1-8. يتميز هذا التصميم بسهولة تصنيعه وانخفاض تكلفته، مما يجعله خيارًا مثاليًا للتطبيقات المنزلية أو في المناطق الريفية محدودة الموارد.



الشكل 1-8: المقطر الشمسي أحادي الميل (Chemkhi & Madiouli, 2022)

### 2-2-3-1 المقطر مزدوج الميل (double slope solar still)

يُعد المقطر الشمسي مزدوج الميل من أكثر تصاميم المقطرات الشمسية البسيطة شيوعًا، ويتميز بوجود غطاءين زجاجيين مائلين في اتجاهين متعاكسين كما يوضحه الشكل 1-9، مما يُضاعف من مساحة التكاثر الفعالة مقارنةً بالتصاميم أحادية الميل.

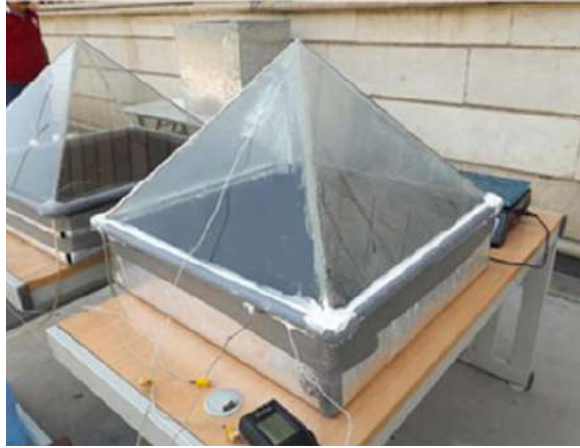


الشكل 1-9: المقطر الشمسي ثنائي الميل (H. Hassan et al., 2019)

يوفر هذا التصميم ميزة التقاط الإشعاع الشمسي من كلا الجانبين، مما يُعزز من كفاءة النظام خلال ساعات النهار المختلفة، خصوصًا في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المتغير الاتجاه. كما يساهم الميل المتعاكس للزجاج في تحسين تصريف قطرات الماء المقطر وتقليل فقدان الحرارة بالإشعاع (Fathy et al., 2018).

### 3-2-3-1 المقطر الهرمي (Pyramid Solar Still)

في هذا النوع من أجهزة التقطير الشمسي، يُصمم الغطاء العلوي على شكل هرم، ولذلك يُعرف باسم جهاز التقطير الشمسي الهرمي الشكل 1-10. يتميز هذا التصميم الهندسي بزيادة مساحة سطح التكثيف مقارنة بجهاز التقطير التقليدي ذي الغطاء المسطح، مما يُحسن من كفاءة التبخر والتكثيف دون الحاجة إلى زيادة مساحة قاعدة الحوض. هذا يسمح بإنتاج كمية أكبر من المياه النقية من نفس مساحة الحوض، مما يجعله أكثر إنتاجية (A. K. Singh et al., 2019).



الشكل 1-10: المقطر الشمسي الهرمي (Alawee et al., 2021)

### 4-2-3-1 المقطر الشمسي نصف الكروي (Hemispherical Solar Still)

يُعد المقطر الشمسي نصف الكروي من الأنظمة البسيطة والفعالة نسبيًا في تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية، ويمتاز بتصميمه الذي لا يتطلب أي أنظمة تعقب لأشعة الشمس، مما يقلل من تعقيد النظام وتكاليف تشغيله وصيانته. يعتمد هذا النظام على هيكل حوض مائي مغطى بغطاء زجاجي شفاف على شكل نصف كرة، يسمح بامتصاص إشعاع شمسي موحد وعالي الكفاءة من جميع الاتجاهات على مدار اليوم الشكل 1-11.

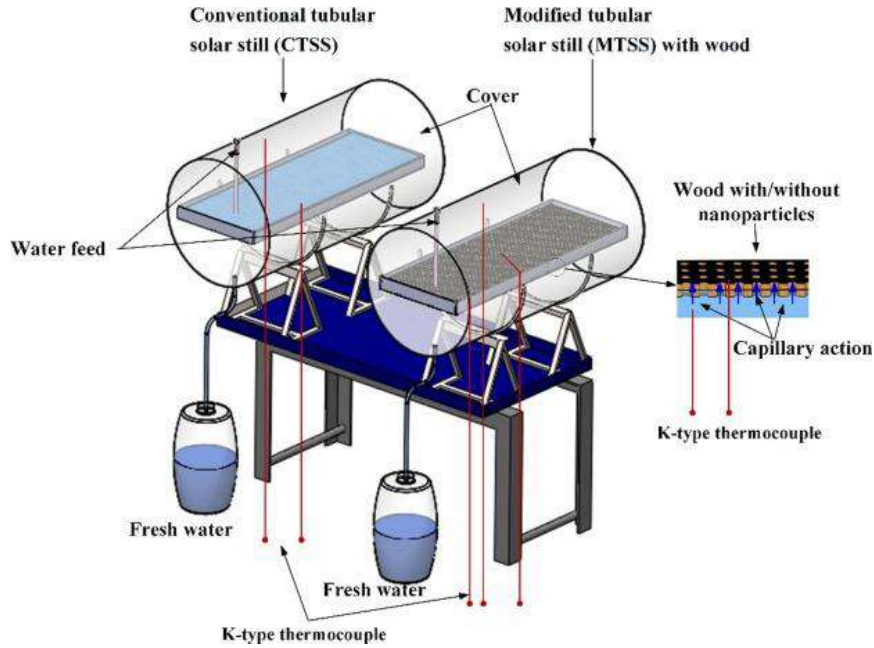
يعزز التصميم نصف الكروي من كفاءة امتصاص الطاقة الشمسية بفضل زاويته الانسيابية التي تقلل من انعكاس الإشعاع، لكنه يعاني من بعض القيود التشغيلية. من أبرز هذه القيود: العمق الكبير للماء عند مركز الحوض، مما يقلل من معدل التبخر وبالتالي يُضعف كفاءة التقطير، بالإضافة إلى محدودية مساحة التكاثر الفعالة على السطح الداخلي للغطاء الزجاجي، الأمر الذي يحدّ من إنتاجية الماء المقطر. (A. K. Singh, et al., 2019).



الشكل 1-11: المقطر الشمسي النصف الكروي (Kabeel et al., 2023)

### 5-2-3-1 المقطر الشمسي الأنبوبي (Tubular Solar Still)

يُعد المقطر الشمسي الأنبوبي من التصميمات الحديثة والمبتكرة في مجال تحلية المياه بالطاقة الشمسية الشكل 1-12، ويعتمد في تشغيله على أنبوب طويل يحتوي بداخله على حوض مستوٍ رقيق مملوء بطبقة رقيقة من الماء.



الشكل 1-12: المقطر الشمسي الأنبوبي (Abdullah et al., 2025)

يتيح هذا التصميم زيادة مساحة التبخر وتقليل فقدان الحرارة، مما يُعزز من كفاءة التقطير دون الحاجة إلى استخدام أنظمة تتبع شمسية، وهو ما يجعل النظام بسيطاً وفعالاً من حيث التكاليف (Kabeel et al., 2020).

### 6-2-3-1 المقطر الشمسي المخروطي (Conical Solar Still)

يُعد المقطر الشمسي المخروطي من التصميمات غير التقليدية في تقنيات التقطير الشمسي، ويتميز بغطاء زجاجي أو بلاستيكي على شكل مخروط يُغطي حوض التبخر الدائري الشكل 1-13. يوفر الشكل الهندسي المخروطي عدة مزايا مقارنة بالتصاميم التقليدية، من أبرزها: امتصاص شمسي متساوٍ من جميع الاتجاهات على مدار اليوم نتيجة الشكل الدائري المتناظر، زيادة مساحة التكاثر الفعالة مما يُحسن من إنتاجية المياه و تصريف فعالٍ لقطرات الماء المقطر نحو الحواف بفعل الجاذبية، دون الحاجة إلى ميل حاد (Kabeel et al., 2024).

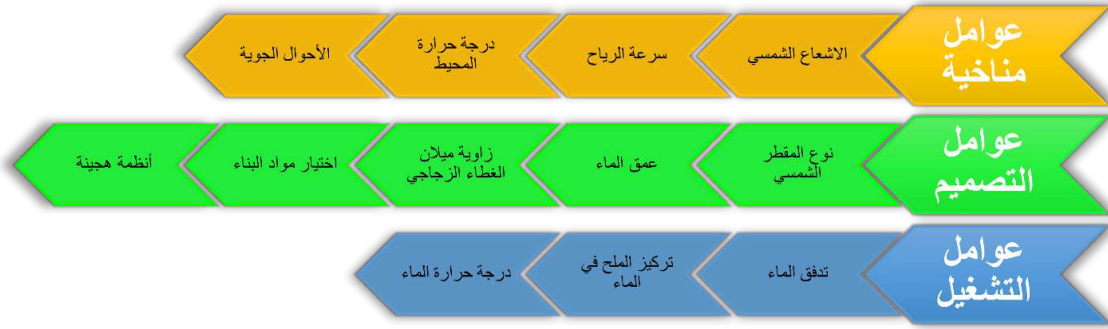


الشكل 1-13: المقطر الشمسي المخروطي (Kabeel et al., 2024)

## 4-1 العوامل المؤثرة على أداء المقطر الشمسي

يمكن تصنيف العوامل المؤثرة على الأداء الحراري للمقطر الشمسي إلى ثلاث فئات رئيسية: العوامل المناخية، العوامل التصميمية، والعوامل التشغيلية الشكل 1-14. تشمل العوامل المناخية: شدة الإشعاع الشمسي، سرعة الرياح، الظروف الجوية مثل الغبار وتكوّن الغيوم، ودرجة حرارة الهواء المحيط. وتجدر الإشارة إلى أن هذه العوامل تقع خارج نطاق السيطرة، مما يُشكل تحدياً في تحقيق أداء ثابت وفعال للمقطر الشمسي. أما العوامل التصميمية، فتتضمن: مساحة حوض التقطير، مساحة السطح المعرض للتبخر، زاوية ميل الغطاء الزجاجي، الشكل الهندسي العام للنظام، اتجاه توجيه المقطر بالنسبة للشمس، المواد الإنشائية المستخدمة في

تصنيع المقطر، ونوع وسمك المادة العازلة. تؤثر هذه العناصر بشكل مباشر على كفاءة امتصاص الإشعاع الشمسي وتقليل الخسائر الحرارية. في حين تشمل العوامل التشغيلية: فرق درجة الحرارة بين سطح الزجاج والماء في الحوض، درجة حرارة الزجاج، درجة حرارة ماء الحوض، فعالية دمج النظام مع تقنيات هجينة، تطبيق أنظمة التفريغ (vacuum)، وتقنيات تخزين الحرارة. وتتميز العوامل التصميمية والتشغيلية بإمكانية التحكم بها بدقة، مما يسمح بتحسين الأداء الحراري للعام للمقطر الشمسي بشكل ملحوظ.



الشكل 1-14: العوامل المؤثرة على أداء المقطر الشمسي

## 1-4-1 العوامل المناخية

من المعروف أن المقطر الشمسي هو جهاز يعتمد على الطاقة الحرارية الشمسية كمصدر رئيسي للطاقة لإنتاج المياه الصالحة للشرب من خلال عملية التبخر والتكاثف. وبما أن هذا النظام يعتمد كليًا على الطاقة الشمسية كمصدر طاقى مدخل، فإن الأداء الحراري للمقطر الشمسي يتأثر بشكل مباشر بقوة وتوزيع هذه الطاقة. وتُحدد الطاقة الشمسية المتاحة من خلال عدة عوامل مناخية رئيسية، أبرزها: شدة الإشعاع الشمسي (Solar Intensity)، سرعة الرياح (Air Speed)، وجود الغبار أو الغيوم (Dusty and Cloudy Conditions)، ودرجة حرارة الهواء المحيط (Ambient Temperature). تؤثر هذه العوامل بشكل كبير في التوازن الحراري داخل المقطر، وبالتالي في كفاءة عمليتي التبخر والتكاثف. تلعب هذه المتغيرات المناخية دورًا حيويًا في تغيير فرق درجة الحرارة بين سطح الماء والسطح الزجاجي العلوي، وهو العامل المحدد لمعدلات انتقال الحرارة بالحمل (Convective Heat Transfer) والتبخر (Evaporative Heat Transfer) على سبيل المثال، زيادة الإشعاع الشمسي ترفع درجة حرارة الماء في الحوض، مما يزيد من فرق درجات الحرارة ويعزز عملية التبخر، في حين أن ارتفاع سرعة الرياح أو انخفاض حرارة الهواء المحيط يمكن أن يزيد من معدل فقد الحرارة، ويؤثر سلبيًا على الكفاءة الكلية. وعلى الرغم من أن هذه العوامل المناخية لا يمكن التحكم بها، فقد أجريت العديد من الدراسات لتقييم تأثيرها على أداء المقطرات الشمسية، وذلك بهدف تحديد أفضل المواقع الجغرافية لتركيب وحدات التحلية الشمسية، وتحقيق أعلى إنتاجية ممكنة عبر استغلال الظروف المناخية المحلية بأقصى قدر من الكفاءة. ومن الممارسات الهندسية المهمة أيضًا، أن يتم دمج بيانات الأرصاد الجوية مع نماذج حرارية لمحاكاة أداء المقطر

في مواقع مختلفة، مما يساعد على تصميم أنظمة مخصصة للمناخ المحلي من حيث الزاوية المثلى للغطاء الزجاجي، ونوع المادة العازلة، واستخدام أنظمة هجينة إذا لزم الأمر (Essa, Abdullah, Majdi, et al., 2022).

### 2-4-1 العوامل التصميمية

تلعب العوامل التصميمية دورًا حاسمًا في تحسين الأداء الحراري والإنتاجية اليومية للمقطر الشمسي، إذ تؤثر بشكل مباشر على كفاءة امتصاص الإشعاع الشمسي، وانتقال الحرارة داخل النظام، وكذلك فعالية عملية التكاثف. من أبرز هذه العوامل: مساحة حوض التبخر ومساحة السطح المعرض للإشعاع، حيث تزداد كمية الماء المتبخر بزيادة المساحة الفعالة المعرضة للشمس. كما تُعد زاوية ميل الغطاء الزجاجي من المعلمات التصميمية بالغ الأهمية، ويجب ضبطها وفقًا لزاوية السقوط المثلى لأشعة الشمس بما يتماشى مع خط العرض الجغرافي، بهدف تعظيم امتصاص الإشعاع وتقليل الفاقد عبر الانعكاس. كذلك تؤثر مادة الغطاء الزجاجي وسمكه على كفاءة انتقال الإشعاع والحرارة إلى داخل المقطر، حيث يُفضل استخدام زجاج عالي النفاذية للإشعاع وقليل الفاقد الحراري. ومن جانب آخر، تؤثر مواد تصنيع المقطر بشكل كبير على الأداء، حيث يُوصى باستخدام مواد ذات امتصاصية حرارية عالية لقاع الحوض مثل الألمنيوم المطلي بالأسود، إلى جانب مواد عازلة ذات موصلية حرارية منخفضة لتقليل الفاقد الحراري من الجوانب. إضافةً إلى ذلك، يُعتبر سمك طبقة الماء في الحوض من العوامل الحيوية؛ إذ إن تقليلها يساهم في تسريع التسخين وزيادة معدل التبخر، بشرط تحقيق توازن بين سرعة التبخر وتوافر الماء المتجدد. وتشمل العوامل التصميمية الأخرى المهمة: الشكل الهندسي العام (isometry)، واختيار المواد العازلة وسمكها، والمسافات الداخلية بين الغطاء وسطح الماء، وجميعها تساهم في ضبط تدفق الحرارة والرطوبة داخل النظام. ويمكن من خلال التعديل الدقيق لهذه العوامل التصميمية تحقيق تحسينات ملموسة في كفاءة المقطر الشمسي، وهو ما سيتم مناقشته بشكل مفصل في المحاور التالية من هذا العمل (Muftah et al., 2014).

### 3-4-1 العوامل التشغيلية

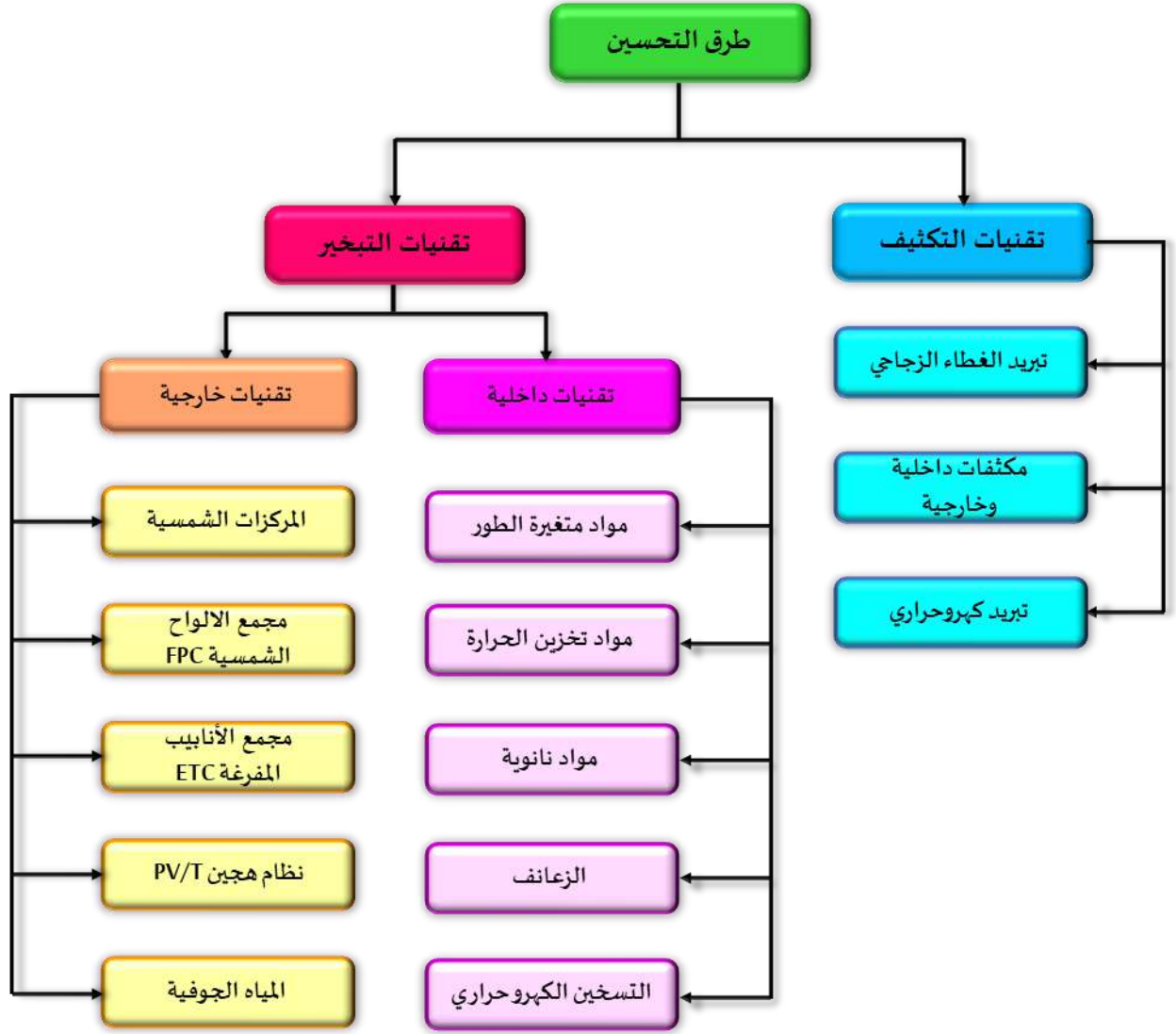
تُعد العوامل التشغيلية من العناصر الأساسية التي تؤثر بشكل مباشر في الأداء الحراري وكفاءة الإنتاج للمقطر الشمسي، نظراً لدورها الفعال في تنظيم عمليات التبخر والتكاثف داخل النظام. من أبرز هذه العوامل: درجة حرارة الماء داخل الحوض، ودرجة حرارة الغطاء الزجاجي، حيث يُعد فرق درجات الحرارة بين سطح الماء والسطح الداخلي للزجاج هو العامل المحدد لمعدل انتقال الحرارة بالحمل والتبخر، وبالتالي كمية المياه المقطرة المنتجة. كلما زاد هذا الفرق، زاد معدل التبخر وتكاثف البخار على السطح البارد.

تشمل العوامل التشغيلية الأخرى معدل تجديد المياه داخل الحوض، والذي ينبغي تنظيمه للحفاظ على عمق مائي مناسب يعزز التسخين السريع دون التأثير على الاستقرار الحراري (Katekar & Deshmukh, 2021).

## 5-1 تحسين أداء المقطر الشمسي

بعد استعراض العوامل المؤثرة على أداء المقطر الشمسي سواء كانت مناخية، تصميمية أو تشغيلية يبرز تساؤل جوهري: كيف يمكن تحسين كفاءة هذا النظام لزيادة إنتاجية المياه العذبة؟ تُعد استراتيجيات التحسين استجابات عملية لهذه التحديات، حيث يمكن رفع أداء المقطر الشمسي بفعالية من خلال توظيف وتكامل العوامل الثلاثة بشكل مدروس.

فيما يتعلق بـ العوامل المناخية، وعلى الرغم من عدم إمكانية التحكم بها، فإنه يمكن استغلالها من خلال اختيار الموقع الجغرافي الأمثل الذي يتلقى أعلى معدل من الإشعاع الشمسي، وضبط زاوية ميل الغطاء الزجاجي بما يتوافق مع خط العرض لتحقيق أقصى امتصاص للإشعاع، مع اتخاذ تدابير لحماية المقطر من الغبار والرياح لتحسين الاستقرار الحراري وتقليل الفقد. أما على مستوى العوامل التصميمية، فيُوصى بزيادة مساحة التبخير والتكاثف، واختيار مواد ذات خصائص حرارية مثالية، مثل استخدام قيعان ذات امتصاصية حرارية عالية، ومواد عازلة فعالة تحدّ من فقدان الحرارة. كما يمكن اعتماد تصميمات هندسية تُعزز من كفاءة الأداء، كالمقطرات ذات الأغشية المائلة أو الهرمية. وفيما يخص العوامل التشغيلية، فإن تحسين الأداء يتركز على تعظيم فرق درجات الحرارة بين ماء الحوض وسطح الغطاء الزجاجي، إذ يُمكن رفع حرارة الماء باستخدام مصادر مساعدة أو تقنيات تخزين حراري لتسريع التبخر، وفي المقابل، تبريد السطح الزجاجي لتعزيز التكاثف. كذلك، فإن تقليل عمق الماء في الحوض، أو استخدام مواد فتيلة ومسامات مساعدة، من شأنه أن يزيد من مساحة التبخر الفعالة ويُحسّن من الأداء الكلي. وبالتالي، يمكن تقسيم طرق التحسين إلى تقنيات التكتيف والتبخير حسب الشكل 1-15.



الشكل 1-15: طرق تحسين أداء المقطر الشمسي

### 1-5-1 تقنيات التبخير

تشكل عملية التبخير المرحلة الأساسية في أنظمة التقطير الشمسي، حيث تعتمد كفاءتها بشكل مباشر على قدرة النظام على امتصاص وتحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة كامنة. في هذا السياق، تتنوع تقنيات التحسين بين حلول داخلية وخارجية:

### 1-1-5-1 تقنيات داخلية

#### أ) مواد متغيرة الطور

تعتمد هذه التقنية على استخدام مواد متغيرة الطور (Phase Change Materials) لتحسين كفاءة المقطر الشمسي من خلال تخزين الطاقة الحرارية وإطلاقها عند الحاجة. تعمل آلية التحسين على ثلاث مراحل رئيسية: (1) أثناء ساعات الذروة الشمسية، تمتص مادة PCM (مثل البارافين أو الأملاح الهيدراتية) الحرارة الزائدة وتخزنها في صورة حرارة كامنة خلال عملية الانصهار، (2) عند انخفاض الإشعاع الشمسي أو خلال الليل، تتصلب المادة وتطلق الحرارة المخزنة، (3) هذه الحرارة المنبعثة تحافظ على استمرارية عملية التبخير لفترات أطول. تظهر الدراسات أنه أدى استخدام PCM إلى بلوغ إنتاجية قصوى لجهاز التقطير الشمسي حوالي 14.5 كجم/م<sup>2</sup>، أي أعلى بنسبة 83.7% من جهاز التقطير الشمسي التقليدي (Dhivagar & Kannan, 2022). وفي بحث آخر قام به (Kabeel, Abdelaziz, et al., 2019) بلغ عائد مياه التقطير الشمسي باستخدام مادة الحصى الأسود المركبة 3.27 لتر/م<sup>2</sup> بزيادة قدرها 37.55%.

#### ب) مواد تخزين الحرارة

تعتمد هذه التقنية على استخدام مواد متخصصة لتخزين الطاقة الحرارية الفائضة خلال فترات ذروة الإشعاع الشمسي، وإطلاقها لاحقاً عند انخفاض الإشعاع أو أثناء الليل، مما يساهم في تحسين كفاءة الأنظمة الحرارية الشمسية. وقد تناولت العديد من الدراسات البحث في المواد المثلى لتخزين الحرارة، حيث أجرى (Khatod et al., 2022) مراجعة شاملة حول أجهزة التقطير الشمسي المدمجة بمواد تخزين الحرارة الحساسة، بهدف تحديد المادة الأنسب لأنواع معينة من تصاميم هذه الأجهزة. أظهرت نتائج الدراسة أن استخدام صفيحة امتصاص مطلية بطبقة نانوية من أكسيد النحاس أدى إلى تحقيق أعلى إنتاجية في جهاز تقطير شمسي أحادي الحوض ومنحدر واحد، مع زيادة قدرها 53% مقارنةً بجهاز التقطير التقليدي. وفي دراسة أخرى، قام (Sambare et al., 2023) بتقييم أداء جهاز تقطير شمسي أنبوبي باستخدام ثلاثة أنواع من مواد التخزين الحراري: قماش الجوت، وقطع الحديد، وشبكة سلكية. خلصت الدراسة التجريبية إلى أن الشبكة السلكية تتمتع بأعلى إنتاجية على الإطلاق؛ لوحظ تحسن بنسبة 41.35% و 10.33% و 29.78% عند مقارنتها بأجهزة التقطير الشمسي التقليدية، وقطع الحديد، وقماش الجوت، على التوالي.

#### ج) موائع نانوية

تستند هذه التقنية المتقدمة إلى دمج المواد النانوية في تصميم المقطر الشمسي لتعزيز كفاءة امتصاص الطاقة الحرارية وتحسين انتقال الحرارة. تعمل المواد النانوية على تعديل الخصائص الحرارية والضوئية للنظام عبر ثلاث آليات رئيسية: (1) زيادة امتصاص الإشعاع الشمسي بسبب خصائصها الامتصاصية الفريدة، (2) تحسين انتقال الحرارة بسبب مساحة السطح الكبيرة والتوصيل الحراري العالي، (3) تغيير الخصائص السطحية

لتعزيز تكوين البخار وتكثيفه. اين تم اجراء العديد من التجارب حيث قام (Abdullah et al., 2020) بدراسة تأثير خليط صلب عديم اللون (شمع) مع جسيمات نانوية من أكسيد النحاس كمادة متغيرة الطور (PCM)، وإضافة جسيمات نانوية من أكسيد النحاس مع لوح امتصاص مطلي باللون الأسود في صواني جهاز التقطير الشمسي. بناءً على النتائج، تم تحسين إنتاجية صواني الماء الكلية لجهاز التقطير الشمسي عند استخدام عاكس وجسيمات نانوية مختلطة من أكسيد النحاس مطلية باللون الأسود، وعاكس و PCM مع جسيمات نانوية من أكسيد النحاس وعاكس وجسيمات نانوية مختلطة من الطلاء الأسود و PCM بنسبة 57.14% و 70.7% و 108% على التوالي، مقارنةً بالأجهزة التقليدية. و في بحثٍ آخر، بحث (Arunkumar et al., 2020) في ألواح امتصاص نانوية مطلية بأكسيد النحاس (CuO-NCAP)، على جهاز تقطير شمسي أحادي المنحدر وتحصل على إنتاجية بلغت حوالي 2.6 لتر/م<sup>2</sup>.

#### د) الزعانف

تُعد الزعانف الحرارية من الوسائل الفعالة لتحسين أداء أجهزة التقطير الشمسي، وذلك عبر تعزيز انتقال الحرارة من السطح الساخن إلى المياه المألحة من خلال زيادة مساحة التبادل الحراري. تصنع هذه الزعانف غالبًا من النحاس أو الألومنيوم، وتُستخدم بأشكال وتصاميم متنوعة. في دراسة ل (Panchal et al., 2020) تبين أن استخدام الزعانف الرأسية والمائلة في أجهزة التقطير أدى إلى زيادة في الإنتاجية بنسبة 24.19% و 26.77% على التوالي مقارنةً بالتصميم التقليدي المغلق. أما (Abdelgaied et al., 2021)، فقد حسّن أداء جهاز تقطير أنبوبي عبر تركيب زعانف نحاسية مجوفة، حيث رفعت الزعانف المربعة الإنتاجية بنسبة 33% (من 4.15 إلى 5.52 لتر/م<sup>2</sup>/يوم)، بينما أدت الزعانف الدائرية إلى زيادة بنسبة 47.2% (لتصل إلى 6.11 لتر/م<sup>2</sup>/يوم).

#### هـ) التسخين الكهروحراري

بدمج الطاقة الكهربائية مع الطاقة الشمسية، يُصبح النظام هجينًا ويعزز أداء المقطر الشمسي من خلال تسريع عملية التبخير، خاصة في الأوقات التي لا تكون فيها الشمس كافية، مما يؤدي إلى تحسين إنتاجية المياه وزيادة كفاءة النظام الكلية. قام (Rahbar et al., 2017) بتحسين مقطر شمسي مزدوج المنحدر مزود بوحدات تسخين حرارية كهربائية لتحقيق أداء ترموديناميكي أفضل، لوحظ أن كفاءة الاستنفاد تزداد خلال أوقات التجارب. تبلغ أقصى كفاءة استنفاد للنظام حوالي 25٪. وحدثت في الساعة 3 مساءً. وفي دراسة أخرى اجراها (Özcan & Deniz, 2023) استخدم التسخين الحراري لتحسين إنتاج المياه، بلغ الإنتاج اليومي للمياه المقطرة من جهاز التقطير الشمسي التقليدي والمحسن 4313 جم/م<sup>2</sup> و 4893 جم/م<sup>2</sup> على التوالي.

### 2-1-5-1 تقنيات خارجية

#### أ) المركبات الشمسية

تعتمد هذه التقنية على استخدام المركبات الشمسية لتركيز الإشعاع الشمسي، بهدف زيادة الكثافة الحرارية الموجهة إلى حوض التقطير، مما يؤدي إلى تسخين سريع وفعال للمياه المالحة. يسهم هذا التركيز في رفع درجة حرارة المياه إلى مستويات عالية، وبالتالي تقليل الفواقد الحرارية وتحسين الكفاءة الحرارية الإجمالية للنظام.

وقد أظهرت الدراسات التجريبية فعالية كبيرة لاستخدام المركبات الشمسية في تعزيز أداء المقطرات الشمسية. ففي دراسة أجراها (Elashmawy, 2017)، تم تسجيل زيادة في الإنتاجية بنسبة بلغت 676% عند استخدام مقطر شمسي أنبوبي مدمج مع مركز شمسي مكافئ. أما في دراسة أخرى لـ (H. Hassan, Yousef, et al., 2020)، فقد حقق المقطر الشمسي أحادي الميل المقترن بمركز شمسي مكافئ إنتاجية بلغت 7.74 كغ/م<sup>2</sup> في الصيف و3.85 كغ/م<sup>2</sup> في الشتاء، مقارنةً بالمقطر التقليدي الذي سجل 3.96 و2.18 كغ/م<sup>2</sup> على التوالي، مما يعكس التأثير الإيجابي الكبير لهذه التقنية في مختلف الظروف المناخية.

#### ب) مجمع الألواح المستوية FPC

يعتمد هذا النظام على تكامل مجمع شمسي حراري مسطح (Flat Plate Collector) مع المقطر الشمسي التقليدي بهدف تعزيز كفاءة عملية التبخير. وتتمثل آلية التشغيل في امتصاص الألواح المعدنية الداخلية للمجمع للطاقة الشمسية وتحويلها إلى حرارة تُنقل عبر أنابيب نحاسية تحتوي على مياه التغذية، مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة المياه قبل دخولها إلى حوض التقطير. ويسهم هذا التسخين المسبق في تحسين أداء المقطر من خلال زيادة كمية البخار الناتج، وبالتالي رفع الإنتاجية.

تشمل الفوائد الأساسية لهذا النظام: زيادة ملحوظة في إنتاجية المياه العذبة مقارنةً بالمقطرات التقليدية، إضافة إلى إمكانية التشغيل لفترات زمنية أطول – حتى بعد غروب الشمس – بفضل الحرارة المخزنة في المياه الساخنة. وقد أكدت النتائج التجريبية فعالية هذا التهجين، إذ سجل (Subramanian et al., 2021) زيادة في الإنتاجية بنسبة 60% باستخدام نظام هرمي هجين، في حين حقق (Manokar et al., 2020) إنتاجية بلغت 7.5 كغ/م<sup>2</sup>/يوم باستخدام نفس مبدأ التكامل.

#### ج) مجمع الأنابيب المفرغة ETC

يُعد دمج مجمع الأنابيب المفرغة (Evacuated Tube Collector - ETC) مع المقطر الشمسي التقليدي من الاستراتيجيات الفعالة لرفع كفاءة أنظمة التحلية الشمسية. يتكون مجمع ETC من أنابيب زجاجية مزدوجة الجدار تفصل بينهما طبقة فراغية تعمل على تقليل الفقد الحراري، مع ضمان امتصاص فعال للإشعاع

الشمسي. تُنقل الطاقة الحرارية الممتصة عبر أنابيب حرارية (Heat Pipes) إلى سائل العمل داخل المقطر، مما يرفع درجة حرارة المياه وبالتالي يعزز معدل التبخر.

أظهرت الدراسة التجريبية التي أجراها (R. V. Singh et al., 2013) أن دمج نظام ETC مع المقطر الشمسي يؤدي إلى زيادة ملحوظة في درجة حرارة المياه وإنتاجية النظام، حيث بلغ متوسط العائد اليومي حوالي 3.8 كجم/م<sup>2</sup>. وفي دراسة أخرى أجراها (Gopi et al., 2022) على نظام تقطير شمسي متعدد التأثيرات (Multi-Effect Solar Still) مدمج مع مجمع ETC، تم إجراء مقارنة بين النتائج العددية والتجريبية، وأظهرت النتائج توافقاً جيداً، حيث بلغ متوسط الإنتاجية اليومية نحو 28.625 كجم/م<sup>2</sup>.

#### د) نظام هجين PV/T

يعتمد نظام التهجين الكهروضوئي الحراري (PV/T) على دمج الخلايا الشمسية الكهروضوئية مع المجمع الحراري في وحدة متكاملة واحدة لتحسين كفاءة المقطر الشمسي. تعمل هذه التقنية على مبدأ الاستفادة المزدوجة من الطاقة الشمسية، حيث تقوم الخلايا الكهروضوئية بتحويل جزء من الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية، بينما يمتص المجمع الحراري الطاقة الحرارية المتبقية لتسخين المياه. يتم نقل الحرارة الممتصة عبر وسط حراري (عادةً الماء أو الهواء) إلى حوض التقطير، مما يرفع درجة حرارة المياه المالحة ويحسن معدل التبخر.

أظهرت الدراسات أن استخدام نظام PV/T مع المقطر الشمسي المتتالي يزيد الإنتاجية بنسبة 56.8% مقارنة بالأنظمة التقليدية (Sarhaddi, 2018). وفي بحث شامل حول اقتران المقطر الشمسي بنظام PV/T أجراه (Jasim et al., 2023) تبين له أن النظام الهجين ينتج ما بين 6 و 12 كجم/م<sup>2</sup> من المياه العذبة يوميًا.

#### هـ) المياه الجوفية

يعتمد هذا النظام الهجين على دمج المقطر الشمسي مع مصدر الطاقة الحرارية الأرضية لتحسين كفاءة عملية التحلية بشكل مستدام. تعمل هذه التقنية من خلال استغلال الحرارة الجوفية الثابتة كمصدر حراري مساعد، يتم نقل الطاقة الحرارية الأرضية إلى حوض التقطير عبر نظام مغلق من الأنابيب الحرارية أو من خلال تبادل حراري مباشر مع المياه المالحة، مما يوفر مصدراً حرارياً إضافياً يعمل على تعزيز عملية التبخر حتى في فترات انخفاض الإشعاع الشمسي أو خلال الليل. أظهرت الدراسات التي أجراها (Okati et al., 2019) أن الدمج بين الطاقة الشمسية والحرارية الأرضية يزيد إنتاجية المقطر بنسبة 30.35%. وفي عمل آخر قامت به (SAADA et al., 2025) تبين لها أن اقتران المقطر الشمسي احادي الميل المتكامل مع المياه الجوفية لمنطقة الدراسة يحقق أعلى إنتاجية يومية للمياه العذبة تبلغ 4.17 لتر/م<sup>2</sup>.

## 2-5-1 تقنيات التكتيف

تمثل مرحلة التكتيف العامل الحاسم في تحديد الإنتاجية النهائية لأنظمة التقطير الشمسي، حيث يعتمد مردود النظام بشكل جوهري على كفاءة تحويل البخار إلى ماء سائل. تتوجه جهود التحسين نحو خلق أكبر فرق حراري ممكن بين البخار المشبع ووسط التكتيف، وذلك عبر مجموعة متكاملة من الحلول التقنية. يشمل ذلك:

### 1-2-5-1 تبريد الغطاء الزجاجي

يعمل نظام تبريد الغطاء الزجاجي على مبدأ خلق فرق حراري كبير بين البخار الساخن داخل المقطر ووسط التكتيف البارد. عند تسخين المياه المالحة، يتصاعد البخار ويلامس السطح الداخلي للغطاء الزجاجي المبرد. يؤدي انخفاض درجة حرارة الزجاج إلى فقدان البخار لحرارته، فيتحول من الحالة الغازية إلى السائلة على شكل قطرات ماء عذب تنزل على السطح المائل لتُجمع في قناة التكتيف، تتم عملية التبريد باستخدام أنظمة تبريد نشطة (تدوير ماء بارد أو مراوح هوائية). اعتمد (Sibagariang et al., 2022) في تحسين المقطر الشمسي على تزويده بتبريد مائي على الغطاء الزجاجي وقد نجح في زيادة إنتاج المياه العذبة بنسبة 28.9% من 0.81 لتر/م<sup>2</sup> يومياً إلى 1.0436 لتر/م<sup>2</sup> يومياً. ومن جهة أخرى قام (Hameed, 2022) بتبريد الغطاء الزجاجي بنوعين: رذاذ الماء المستمر وتبريد الزجاج النبضي (30 ثانية/30 دقيقة)، (30 ثانية/20 دقيقة)، (30 ثانية/10 دقائق)، و(30 ثانية/5 دقائق)، تبرز النتائج أن التبريد النبضي بالماء يُعطي نتائج أفضل من الاستمرار بتوقيت (30 ثانية/10 دقائق) اين تم تحقيق زيادة في الإنتاجية بنسبة 36.7% مقارنة بالمقطر الشاهد.

### 2-2-5-1 مكثفات داخلية وخارجية

تعتمد هذه التقنية على مبدأ تبريد البخار لتحويله إلى ماء سائل. في المكثفات الداخلية، يتم تركيب لوح معدني (عادة من النحاس أو الألومنيوم) داخل حجرة التبخير. عندما يصطدم البخار الساخن بهذا السطح الأقل حرارة، يفقد طاقته ويتحول إلى قطرات ماء تنزل للأسفل لتُجمع. أما المكثفات الخارجية فتعمل بنفس المبدأ ولكن في وحدة منفصلة خارج المقطر، حيث يُوجه البخار عبر أنابيب مبردة إما بالهواء أو الماء لزيادة كفاءة التكتيف. الفرق الرئيسي أن المكثفات الداخلية أبسط وأرخص، بينما الخارجية أعلى كفاءة ولكنها أكثر تعقيداً وتكلفة. تم اختبار جهاز تقطير شمسي معدل بمكثف خارجي من طرف (Alawee et al., 2022) اين أظهرت النتائج أن زيادة الإنتاجية/الكفاءة الحرارية قدرت ب 120%/52% مقارنة بالمقطر العادي. تناولت دراسة أخرى (H. Hassan & Abo-Elfadl, 2017) تأثير اختلاف مواد المكثف وأنواع المياه المالحة على إنتاجية أجهزة التقطير الشمسي. عند استخدام المياه المالحة في الحوض، يُظهر مكثف المشتت الحراري زيادة بنسبة 31% في إنتاجية المياه العذبة اليومية.

### 3-2-5-1 التبريد الكهروحراري

يعتمد المقطر الشمسي المقترن بنظام تعزيز حراري كهربائي لتبريد الغطاء الزجاجي على مبدأ تكثيف البخار بكفاءة عالية من خلال خفض حرارة السطح الداخلي للغطاء الزجاجي، باستخدام وحدات حرارية كهربائية (Thermoelectric Modules – TEC) ، يُبرد جانبها البارد بواسطة تيار مائي يمر عبر قناة حرارية أو أنبوب مائي ملتصق بالغطاء. قام (Esfahani et al., 2011) باستخدام جهاز تبريد حراري كهربائي لتعزيز تكثيف الماء أين تظهر النتائج كفاءة قصوى قدرها 13% لجهاز التقطير في الشتاء حيث يبلغ متوسط الإنتاجية اليومية لجهاز التقطير الشمسي 1.2 لتر/م<sup>2</sup> خلال 9 أيام من التجارب. في حين حقق (Shoeibi et al., 2020) تحسين في الإنتاجية وكفاءة جهاز التقطير الشمسي مزدوج المنحدر المقترن بنظام تعزيز حراري كهربائي يُستخدم لتبريد الغطاء الزجاجي بمقدار 2.32 مرة و76.4% على التوالي، مقارنةً بجهاز التقطير الشمسي التقليدي.

## 6-1 نظام التقطير الشمسي الهجين متعدد التقنيات

تعتمد فلسفة التهجين الفعال لأنظمة التقطير الشمسي على مبدأ التكامل التآزري بين تقنيات التحسين المختلفة الخاصة بالتبخير أو التكثيف المذكورة سابقا، حيث يتم الجمع بين مزايا كل تقنية لتعويض نقاط ضعف الأخرى. تتبع هذه الفلسفة منهجية ثلاثية الأبعاد: (1) التكامل الوظيفي الذي يضمن توزيعاً أمثل لمهام امتصاص الطاقة، نقل الحرارة، وتخزينها بين المكونات المختلفة، (2) التكامل الزمني الذي يوازن بين الأداء خلال فترات الذروة الشمسية وساعات انخفاض الإشعاع، و(3) التكامل المكاني الذي يحقق الترتيب الهندسي الأمثل للمكونات. على سبيل المثال، يمكن للدمج بين المواد النانوية (لتحسين الامتصاص الضوئي) ومواد PCM (للتخزين الحراري) والتبريد الكهروحراري (لتعزيز التكثيف) أن يحقق تحسناً تراكمياً يفوق مجموع تحسينات كل تقنية على حدة، حيث تتفاعل هذه التقنيات لخلق تأثير تآزري. تعتمد نجاحية التكامل على تحليل دقيق لمعايير التوافق الحراري والديناميكي بين المكونات، مع الأخذ في الاعتبار أن التصميم الأمثل يجب أن يوازن بين تحسين الأداء وزيادة التعقيد، بحيث لا تتجاوز التكلفة الإضافية للمكونات الهجينة الفوائد التشغيلية المتحققة. يلخص الجدول 1-1 بعض الاعمال التي تتضمن التهجين متعدد التقنيات:

الفصل 1: المراجعة الأدبية لتقنيات المقطرات الشمسية والتهجين

الجدول 1-1: مراجعة أدبية حول تحسين أداء المقطر الشمسي

المراجع	نوع التحسين	نوع المقطر الشمسي	الإنتاجية اليومية (لتر/م <sup>2</sup> )	الكفاءة الطاقوية (%)	تكلفة اللتر (\$/لتر)
(Eltawil & Omara, 2014)	مكثف خارجي+مجمع الالواح المسطحة FPC	مقطر شمسي احادي الميل	4	82	0.052
(Mahian et al., 2017)	FPC+مبادل حراري+جسيمات نانوية	مقطر شمسي احادي الميل	2.95	36.5	-
(Kabeel & Abdelgaied, 2017)	المركز الشمسي القطع المكافئ PTC+مبادل حراري+مواد متغيرة الطور PCM	مقطر شمسي احادي الميل	10.7	25.73	0.017
(Sharshir et al., 2019)	المجمع الشمسي الانبوبي المفرغ ETC+جسيمات نانوية	مقطر شمسي هرمي	4.3	64.5	0.036
(Shehata et al., 2020)	PCM+ETC+مرطب بالموجات فوق صوتية	مقطر شمسي احادي الميل	7.4	32	0.037
(Parsa, Rahbar, Koleini, et al., 2020)	التسخين الكهروحراري THE+جسيمات نانوية+مكثف خارجي	مقطر شمسي احادي الميل	7.9	25.77	-
(Saha et al., 2024)	تطبيق التفريغ PCM+	مقطر شمسي ثنائي الميل	7.03	22.33	0.0058
(Alqsair, 2024)	ملف تسخين لولبي نحاسي+عواكس داخلية+مروحة لطرذ البخار+PCM+جسيمات نانوية	مقطر شمسي احادي الميل	8.45	164	0.018
(Essa, Abdullah, Alawee, et al., 2022)	جسيمات نانوية + PCM+PTC	مقطر شمسي انبوبي	9.7	208	0.024
(AbuShanab et al., 2022)	فتائل معلقة+عواكس+PCM+جسيمات نانوية	مقطر شمسي هرمي	8.14	154.38	0.0089

-	28.6	4.6085	مقطر احادي الميل	زعانف+عواكس داخلية	(Bataineh & Abbas, 2020)
0.1055	76.4	2.9	مقطر شمسي ثنائي الميل	تبريد كهرورحاري+تسخين كهرورحاري	(Shoeibi et al., 2020)
0.019	20	9.7	مقطر شمسي احادي الميل	PTC+مبادل حراري	(H. Hassan, Ahmed, et al., 2020)
0.0268	300	12.5	مقطر شمسي احادي الميل	سخان شمسي	(Alwan et al., 2021)
0.015	152	10.5	مقطر شمسي نصف كروي	ماص نصف كروي+عاكس+ PCM-فضة	(Alqsair et al., 2024)
-	53.01	5	مقطر شمسي احادي الميل	سيقان النخيل	(Kemerchou et al., 2024)
0.017	195	10.800	مقطر شمسي هرمي	عواكس+دورة تبريد+حبال فتائل معلقة	(Essa et al., 2021)
0.25	44.3	13.63	مقطر شمسي احادي الميل	الخلية الشمسي PV + PTC	(Kabeel, Khairat Dawood, et al., 2019)
0.041	16.2	5.5	مقطر شمسي احادي الميل	مكثف خارجي	(Ibrahim et al., 2015)
0.0466	41.1	4.92	مقطر شمسي احادي الميل	وحدة شمسية ضوئية +SPV+مكثف سلبي	(Saini et al., 2019)
0.0154	250	11.14	مقطر شمسي احادي الميل	PTC+مبادل حراري+ PCM	(Khairat Dawood et al., 2020)
0.0252	81	4.6	مقطر شمسي احادي الميل	التبريد الكهرورحاري+جسيما ت نانوية	(Nazari et al., 2019)
0.098	23.2	-	مقطر شمسي ثنائي الميل	التبريد والتسخين الكهرورحاري+جسيما ت نانوية	(Shoeibi et al., 2021)
0.019	43.68	8.6	مقطر شمسي احادي الميل	قناة مجهزة بالحراريات	(Sadeghi & Nazari, 2021)

				الكهربائية+ ETC+جسيمات نانوية	
0.027	183	8.44	مقطر شمسي احادي الميل	مواد تخزين الحرارة+المجمع الشمسي المسطحFPC	(Abdelmaksoud, 2025)
-	45.2	0.38	مقطر شمسي ثنائي الميل	عازل+المنيوم+PCM	(Kouravand et al., 2025)
0.0139	36	2.5	مقطر شمسي احادي الميل	مكبر الصوت+مروحة+مك ثف	(Immanual et al., 2025)
0.0182	42.3	3.9	مقطر شمسي ثنائي الميل	PV+مواد تخزين الحرارة	(Dhivagar et al., 2025)
0.0119	-	4.28	مقطر شمسي احادي الميل	عدسة فريينسال المركزة+سخان شمسي+خزان	(El-Ghandour et al., 2025)
0.019	617.4	16.5	مقطر شمسي عمودي	أقراص دوارة	(Essa et al., 2025)

## 7-1 الخاتمة

يختتم هذا الفصل بتحليل شامل يربط بين المفاهيم الأساسية لأنظمة التقطير الشمسي وتقنيات تحسينها، حيث تم استعراض التطور التاريخي للمقطرات الشمسية منذ نشأتها وحتى أحدث التصاميم المعاصرة. تظهر الدراسة أن كفاءة هذه الأنظمة تعتمد على تفاعل معقد بين ثلاثة عوامل رئيسية: العوامل المناخية، التصميمية، والتشغيلية. ابرزت التحليلات المقارنة أن تقنيات التحسين الحديثة سواء في مرحلة التبخير أو التكتيف قادرة على رفع الإنتاجية مقارنة بالأنظمة التقليدية. كما بينت الدراسات أن التكامل بين هذه التقنيات في أنظمة هجينة متعددة الوظائف يحقق تأثيراً تآزرياً يفوق مجموع تحسينات كل تقنية على حدة. من الجدير بالذكر أن اختيار نظام التحسين الأمثل يجب أن يراعي التوازن بين: الكفاءة الحرارية المستهدفة، التكلفة الاقتصادية، ملاءمة الظروف المناخية المحلية و سهولة الصيانة والتشغيل.

هذه الأسس النظرية تشكل الإطار المعرفي اللازم للانتقال إلى الفصول التطبيقية القادمة، والتي ستتناول تصميم وتقييم أنظمة هجينة مبتكرة قادرة على تلبية احتياجات المناطق المختلفة، مع التركيز على الجدوى الاقتصادية والاستدامة البيئية.

الفصل 2: منهج تحليلي  
رقمي لتقييم الأداء والاستدامة  
في المقطرات الشمسية

## 1-2 المقدمة

يُعد المقطر الشمسي أحد الحلول المستدامة لمعالجة مشكلة ندرة المياه، حيث يعتمد على الطاقة الشمسية لتبخير المياه غير النقية وتكثيفها للحصول على ماء نقي. يهدف هذا الفصل إلى تقديم تحليل متكامل لأداء المقطر من خلال استعراض المعايير الأساسية مثل الإنتاجية والكفاءة، مع استخدام أدوات القياس الذكي المعتمدة على نظام الأردوينو لرصد البيانات بدقة. كما يتناول الفصل دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ والتحكم لتحسين كفاءة التشغيل. وفي النهاية، يتم تقييم الجدوى الاقتصادية والاستدامة البيئية للنظام.

## 2-2 التحليل الشامل لأداء المقطر الشمسي

### 1-2-2 المعايير الأساسية للأداء

#### 1-1-2-2 الإنتاجية (Productivity)

تمثل كمية الماء المقطر الناتج خلال فترة زمنية محددة لكل وحدة مساحة، وهي مؤشر مباشر على قدرة النظام. تُحسب باستخدام المعادلة 2-1 (Pal et al., 2021):

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{A_s \times t}$$

معادلة 2-1

حيث:

$\dot{m}_w$  الإنتاجية (لتر/م<sup>2</sup>يوم)

$m_w$  كتلة الماء المقطر (لتر أو كغ)

$A_s$  المساحة الكلية للمقطر (م<sup>2</sup>)

$t$  الزمن (يوم)

### 2-1-2-2 كفاءة الطاقة (Energy Efficiency)

يتم التعبير عن كفاءة الطاقة كنسبة كمية الطاقة الحرارية المستخدمة لإنتاج كمية محددة من الماء المقطر و الطاقة الشمسية الساقطة خلال فترة زمنية محددة، ويمكن وصف الكفاءة الحرارية لوحدة التقطير

بالمعادلة 2-2 (Anika et al., 2024a)

$$\eta = \frac{\sum \dot{m}_w \times L_v}{\sum I \times A_s \times 3600} \times 100$$

معادلة 2-2

اين:

$\dot{m}_w$  الإنتاجية (لتر/م<sup>2</sup>·يوم)

$L_v$  تمثل الحرارة الكامنة لتبخير الماء (جول/كغ).

$I$  شدة الاشعاع الشمسي (واط/م<sup>2</sup>)

$A_s$  المساحة الكلية للمقطر (م<sup>2</sup>)

تعطى عبارة  $L_v$  بالمعادلة 2-3 و المعادلة 2-4 (Anika et al., 2024a):

$$L_v = 3.1615(10^6 - 761.6 \times T_i); \quad T_i > 343$$

معادلة 2-3

$$L_v = 2.4935(10^6 - 947.69 \times T_i + 0.13132 \times T_i^2 - 0.0047974 \times T_i^3); \quad T_i < 343$$

معادلة 2-4

اين:  $T_i = \frac{T_w + T_{gi}}{2}$  هي درجة حرارة الماء و  $T_{gi}$  هي درجة حرارة الزجاج الخارجي.

### 3-1-2-2 كفاءة الإكسرجي (Exergy Efficiency)

الإكسرجي هو مقياس لجودة الطاقة، أي يُعبّر عن الجزء المفيد من الطاقة الذي يمكن تحويله إلى شغل (عمل) حقيقي. في حالة المقطر الشمسي، يكشف تحليل الإكسرجي مدى إمكانية تحويل الطاقة الشمسية الداخلة إلى ناتج مفيد، مثل إنتاج المياه العذبة. ويُقاس معامل كفاءة الإكسرجي كنسبة بين الإكسرجي الناتج إلى الإكسرجي الداخل. ومن خلال تحليل الإكسرجي، يمكن للمهندسين والباحثين تحديد سبل تحسين أداء

المقطرات الشمسية واستدامتها، مما يُسهم في تعزيز تطبيقاتها العملية في مجالات تحلية المياه وإدارة الموارد (Attia et al., 2021; Pal et al., 2021). تعطى عبارة الاكسرجي بالمعادلة 2-5 التالية:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{ex,out}}{E_{ex,in}} \times 100$$

معادلة 2-5

اين  $E_{ex,out}$  يعبر عن الاكسرجي الناتج وحسب بالمعادلة 2-6 التالية:

$$E_{ex,out} = \frac{\dot{m}_w}{3600} \times A_s \times L_v \times \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_w}\right)$$

معادلة 2-6

و  $E_{ex,in}$  هو الاكسرجي الداخل ويعطى بالمعادلة 2-7 التالية:

$$E_{ex,in} = A_s \times I \times \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)^4\right]$$

معادلة 2-7

حيث:

$T_{sun}$  درجة حرارة الشمس وتقدر ب 6000 K

$T_{amb}$  درجة حرارة المحيط

$T_w$  درجة حرارة الماء

## 2-2-2 منهجية التحليل التجريبي

يعتمد التحليل التجريبي لأداء المقطر الشمسي على جمع بيانات دقيقة ومستمرة من التجارب الميدانية التي تُجرى تحت ظروف بيئية طبيعية، وذلك باستخدام منظومات قياس ذكية قادرة على رصد المتغيرات الحرارية والفيزيائية التي تؤثر في كفاءة التشغيل. وتتضمن هذه المتغيرات: درجة حرارة المياه، درجة حرارة الغطاء الزجاجي، درجة حرارة الهواء الداخلي، شدة الإشعاع الشمسي، الرطوبة النسبية، وسرعة الرياح.

ولحساب هذه المتغيرات الحرارية الفيزيائية يتم الاستعانة بحساسات خاصة اين يتم توزيع الحساسات بدقة في نقاط حرجة داخل النظام للحصول على بيانات حرارية وزمنية دقيقة. وتُسجّل القيم باستخدام وحدات تحكم دقيقة مثل الأردوينو، ويتم تخزينها دورياً لتحليلها لاحقاً.

## 2-3 نظام الرصد الآلي باستخدام الأردوينو

في الأنظمة الحرارية كالمقطرات الشمسية، يُعد القياس الدقيق للمتغيرات الفيزيائية (مثل درجة الحرارة، والإشعاع، والرطوبة) أمرًا حاسمًا لتقييم الأداء. تقليديًا، كانت تُستخدم أدوات قياس يدوية مثل الترمومترات الزئبقية أو مقاييس الإشعاع...، والتي تعتمد على قراءة بشرية مباشرة، هذا النوع من القياس يعاني من عدة نقاط ضعف أبرزها: قابلية الخطأ البشري، بطء تسجيل البيانات، صعوبة المراقبة المستمرة، وعدم القدرة على التوصيل مع أنظمة تحليل أو نمذجة رقمية.

في المقابل، يتيح القياس الرقمي باستخدام الحساسات الدقيقة المرتبطة بوحدة تحكم مثل Arduino رصدًا آليًا عالي الدقة مع تسجيل تلقائي للبيانات، ومعالجة في الوقت الحقيقي، وإمكانية تحليل البيانات إحصائيًا أو تخزينها. كما يمكن التحقق من القيم الشاذة وتصحيحها برمجيًا.

يتميز الأردوينو بأنه منخفض التكلفة، وسهل البرمجة، ويدعم عددًا كبيرًا من الحساسات، مما يجعله خيارًا مثاليًا للباحثين والطلبة لإنشاء منظومات قياس ذكية. إضافة إلى ذلك، فإن دقته وثباته في القراءة تقلل من الخطأ التجريبي واللاتناسق الزمني في البيانات، مما يزيد من موثوقية النتائج النهائية.

لذلك، فإن الاتجاه نحو استخدام وحدات تحكم دقيقة مثل الأردوينو لمراقبة المقطر الشمسي لا يُعد فقط خيارًا تقنيًا حديثًا، بل هو ضرورة علمية لضمان جودة القياسات وصحة التحليل التجريبي.

## 2-3-1 تصميم منظومة القياس الإلكترونية

### 2-3-1-1 التعرف على أساسيات الأردوينو

الأردوينو (Arduino) هو لوح دقيق مفتوح المصدر يمكن برمجته بسهولة وإعادة برمجته في أي وقت. تم تقديم أول إصدار من الأردوينو في عام 2005، حيث صمم في الأصل لتوفير طريقة بسيطة وغير مكلفة للطلاب والمحترفين لتطوير أجهزة قادرة على التفاعل مع البيئة المحيطة باستخدام الحساسات والمشغلات.

يتكون نظام الأردوينو من جزأين رئيسيين: العتاد المتمثل في لوحة التطوير الإلكترونية، والبرمجيات المتمثلة في بيئة التطوير المتكاملة (Arduino IDE). تعتمد هذه اللوحات على معالجات 8-bit من عائلة Atmel AVR أو معالجات 32-bit من عائلة Atmel ARM، ويمكن برمجتها بسهولة باستخدام لغتي C أو C++ عبر بيئة التطوير.

تتميز لوحات الأردوينو بما يلي:

✓ منافذ إدخال وإخراج تمكنها من جمع البيانات من البيئة وإصدار استجابات فعلية.

✓ قدرة على التواصل مع الإنترنت عبر طلبات HTTP عند استخدام وحدات إضافية (Shields).

✓ إمكانية الاتصال بالشبكات اللاسلكية من خلال لوحات مثل ESP التي يمكنها العمل كعميل أو خادم Wi-Fi.

مع تعدد نماذج لوحات الأردوينو في السوق مثل (Uno ، Nano ، Mega) ، فإن اختيار اللوحة المناسب يعتمد على متطلبات المشروع. لكل لوحة مواصفات فريدة من حيث عدد المنافذ، سرعة المعالج، والذاكرة، مما يجعل بعضها أكثر ملاءمة لمشاريع محددة. على الرغم من أن الأردوينو دخل الأسواق الإلكترونية الرئيسية متأخراً نسبياً، إلا أنه أصبح الآن خياراً شائعاً لمشاريع إنترنت الأشياء والتطبيقات الذكية. يستعرض الجدول التالي مختلف أنواع الأردوينو ومختلف خصائصها ( Louis, 2016; Shakirovich Ismailov Zafar Botirovich ) (Jo, 2022).

### 2-1-3-2 انواع الاردوينو

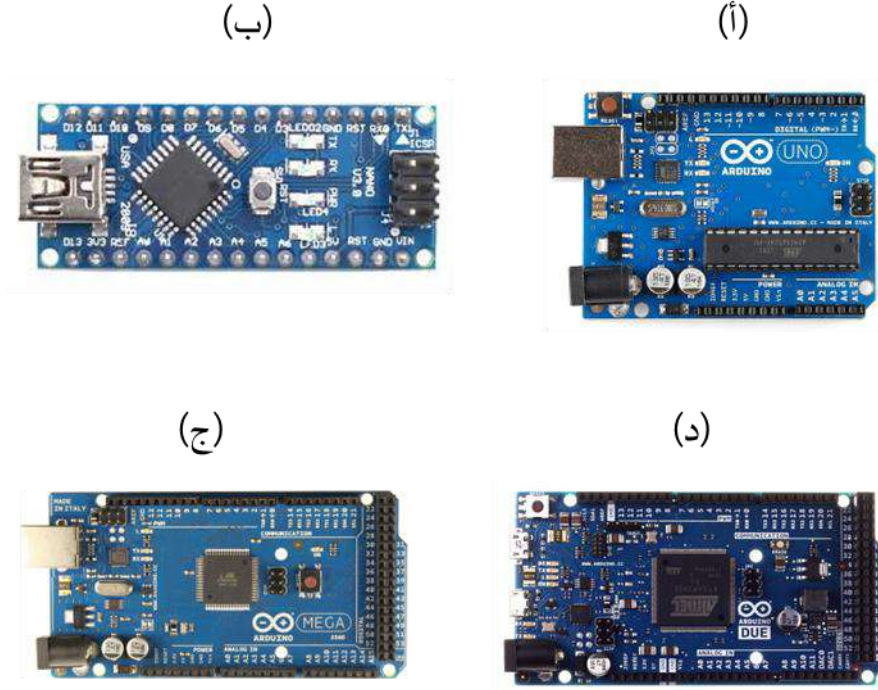
تتوفر العديد من إصدارات لوحات الأردوينو، تختلف من حيث المواصفات التقنية، عدد المداخل والمخارج، نوع المعالج، وحجم الذاكرة، مما يجعل كل نوع مناسباً لفئة معينة من المشاريع الشكل 2-1. من بين هذه اللوحات شائعة الاستخدام نجد:

✓ **Arduino UNO** الأكثر شيوعاً، ويستخدم في التطبيقات التعليمية والمشاريع الصغيرة نظراً لبساطته واعتماده على المعالج Atmega328.

✓ **Arduino Nano** توفر نفس إمكانيات الـ UNO تقريباً ولكن بحجم صغير جداً، مما يجعلها مثالية للمشاريع التي تتطلب دمجاً في مساحات ضيقة.

✓ **Arduino Mega 2560** يتميز بعدد أكبر من المداخل والمخارج، وذاكرة أكبر، ويُستخدم غالباً في المشاريع المعقدة التي تتطلب تعدد الحساسات أو وحدات التحكم.

✓ **Arduino Due** تقدم أداءً عاليًا باستخدام معالج ARM 32-bit ، وهي مناسبة للتطبيقات التي تتطلب معالجة بيانات أسرع (Kondaveeti et al., 2021).



الشكل 2-1: أنواع الاردوينو: أ- Arduino UNO - ب- Arduino Nano - ج- Arduino Mega 2560 - د- Arduino

Due

يقدم الجدول 2-1 ملخص لأشهر لوحات Arduino ومكوناتها:

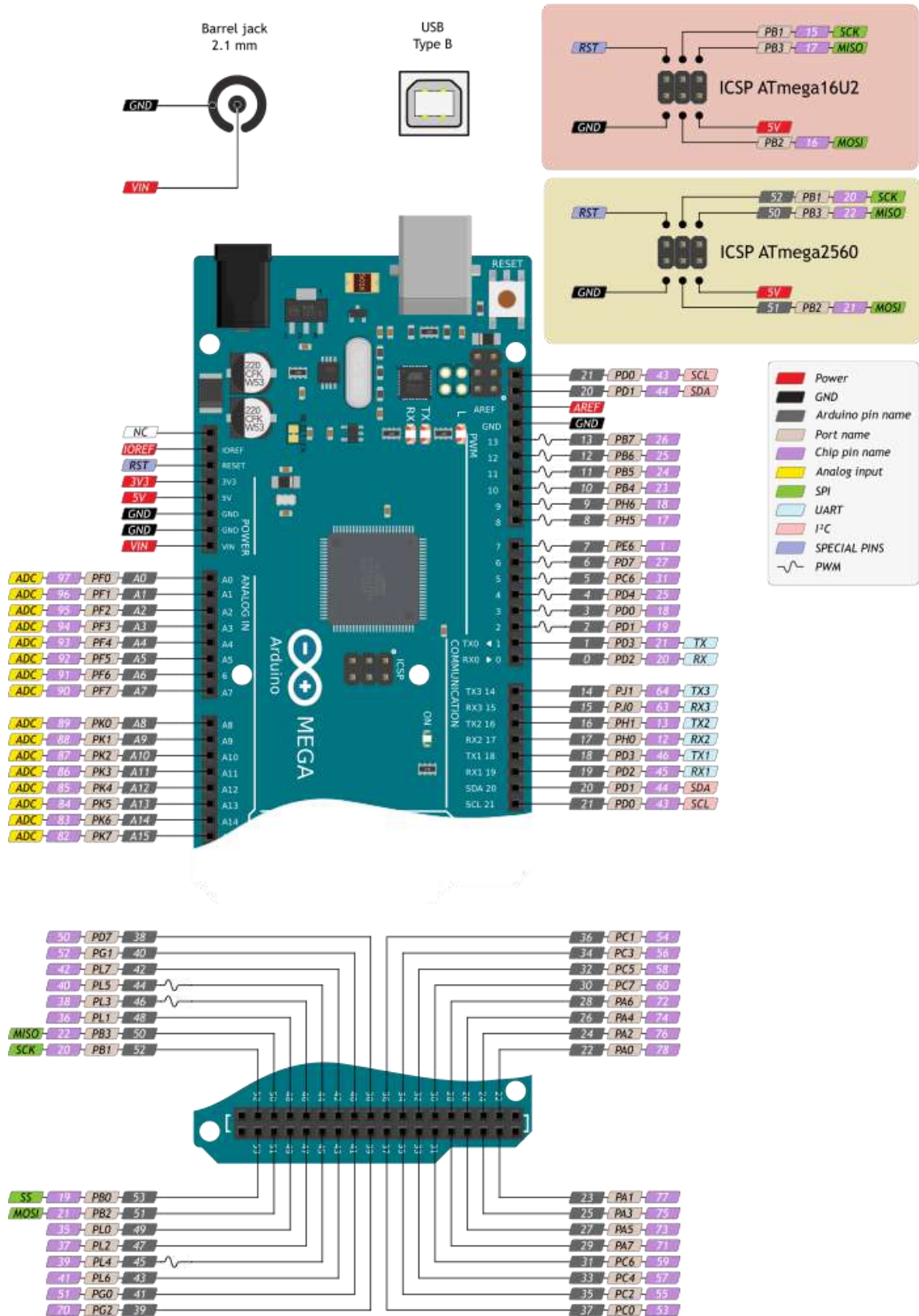
الجدول 2-1: ملخص لوحات Arduino وتطبيقاتها (Kondaveeti et al., 2021)

اسم اللوحة	الأبعاد (مم)	طاقة وحدة المعالجة المركزية والمعالج	إمكانية الإدخال/الإخراج	الجهد الكهربائي	حجم الذاكرة	أنواع المشاريع الأنسب للنماذج الأولية	المكونات
Arduino Uno	54 × 69	16 MHz ATMega328	14	5V	32 kb + 1 kb EEPROM + M	النمذجة الأولية لسطح المكتب، تُستخدم مع درع أردوينو	مستشعرات إنترنت الأشياء، وحدة تحكم روبوت بسيطة، سيارات تحكم عن بُعد، منصات ألعاب بسيطة، اختبار الأجهزة

		KB 2 RAM					
طائرات التحكم عن بُعد، إلكترونيات محمولة، تجميع أجهزة الاستشعار	مشاريع بسيطة، منخفضة التكلفة، ذات تصميم صغير	32 kb + 1 kb EEPROM M + 2 KB RAM	V 5	14	16 MHz ATMega3 28	18 × 45	Arduino Nano
ادوات مكتبية يدوية، تحكم متعدد الأجهزة، وحدة تحكم في الآلات	متطلبات إدخال/إخراج عالية مع مساحة ذاكرة أكبر	256 kb ROM + 8 kb RAM + 5 V 4 kb EEPROM M	V 5	54	16 MHz ATMega2 560	101.52 × 53.3	Arduino Mega
معالج بيانات للبيانات، من مصادر متعددة، ووحدة تحكم بالآلات	نماذج أولية عالية الأداء مع مدخلات ومخرجات تناظرية فائقة	512 KB ROM + 96 KB RAM	3.3 V	54	84 MHz AT91SAM 3X8E	101.52 × 53.3	Arduino Due

### 3-1-3-2 مكونات الـ Arduino

تتكوّن لوحات أردوينو عمومًا من متحكّم دقيق، ومنظّم جهد داخلي، إضافة إلى مأخذ مدخل/مخرج رقمية (Digital I/O) وأخرى تناظرية (Analog In) لربط الحساسات والمحركات والمكونات الإلكترونية، مع منافذ دعم عرض النبض PWM وأضواء مؤشّرة لحالة التشغيل (ON) والنقل التسلسلي (TX/RX) وزرّ Reset لإعادة تشغيل المتحكّم كما يوضحه الشكل 2-2. وتختلف الأنواع فيما بينها بعدد دبابيس المدخل/المخرج، ما يجعل كل نوع مناسبًا لحجم وتعقيد المشروع.



الشكل 2-2: مكونات Arduino Mega (Arduino, 2025b)

اخترنا تسليط الضوء على مكونات لوحة أردوينو ميغا 2560 دون غيرها من أنواع الأردوينو، وذلك لأنها كانت الأداة الأساسية التي اعتمدنا عليها في أعمالنا التجريبية. وقد وفرت لنا هذه اللوحة إمكانيات واسعة من حيث عدد المداخل والمخارج، وسهولة التوصيل، أين تحتوي على:

### ✓ المنافذ الرقمية (Digital Pins)

عددها 54 منفذ (مرقمة من D0 إلى D53)، وظيفتها:

- التعامل مع الإشارات الرقمية (إدخال/إخراج) مثل تشغيل المحركات، LED، أو قراءة الأزرار.
- 15 منفذًا منها تدعم PWM (تعديل عرض النبضة) لتوليد إشارات تماثلية رقميًا (مثل التحكم بسرعة محرك أو سطوع إضاءة)، وتحديدًا المنافذ 2-13 و 44-46.
- الحدود: تيار أقصى 20mA للمنفذ الواحد.

### ✓ المنافذ التماثلية (Analog Pins)

عددها 16 منفذًا (مرقمة من A0 إلى A15)، وظيفتها:

- قراءة الإشارات التماثلية (الجهد المتغير) من حساسات مثل درجة الحرارة، الضوء، أو المقاومات المتغيرة.
- دقة تحويل 10-bit (ترجم الجهد إلى قيمة رقمية بين 0 و1023).

ملاحظة: يمكن استخدامها كمنافذ رقمية عند الحاجة.

### ✓ منافذ الاتصالات (Communication)

- UART (تسلسلي): 4 منافذ (RX0/TX0) إلى (RX3/TX3) للاتصال بـ GPS، الشاشات، أو البلوتوث.
- SPI: منافذ 50 (MISO)، 51 (MOSI)، 52 (SCK)، 53 (SS) للتواصل مع شرائح الذاكرة أو الشاشات.
- I2C: منفذان فقط (SCL-D21، SDA-D20) لتوصيل شاشات LCD، ساعات RTC، أو حساسات متعددة.

### ✓ منافذ الطاقة (Power Pins)

• Vin : جهد دخل خارجي (7-12V) لتغذية اللوحة.

• 5V : مخرج لتغذية الحساسات (تيار أقصى 500mA).

• 3.3V : مخرج بجهد 3.3V (تيار أقصى 50mA).

• GND : 8 منافذ تأريض (أرضي).

• RESET : زر/منفذ لإعادة تشغيل اللوحة.

### ✓ منافذ خاصة (Special Pins)

• AREF : جهد مرجعي خارجي للقراءات التماثلية (اختياري).

• IOREF : يُحدد جهد تشغيل اللوحة (5V) لتوافق الإضافات (Shields).

بالإضافة إلى متحكم ATmega2560 ثُماني النوى، موصّل USB Type-B للاتصال بالحاسوب ويُستخدم كذلك لبرمجة المتحكم وشحن اللوحة، وفي لوحة تظهر أضواء الحالة "ON": (LED Indicators) تدل على تغذية اللوحة وتشغيلها، و "L" متصلة بالمنفذ الرقمي رقم 13 لاختبار البرمجة، وأضواء "TX" و "RX" التي تومض عند إرسال واستقبال البيانات عبر الواجهة التسلسلية (Arduino, 2025).

## 2-3-1-4 أنواع الحساسات

لضمان جمع بيانات دقيقة وشاملة حول أداء المقطر الشمسي، من الضروري دمج مجموعة من الحساسات المتخصصة، كل منها يساهم في مراقبة جانب معين من العملية الحرارية والفيزيائية داخل النظام. يمكن تصنيف الحساسات إلى الفئات التالية الجدول 2-2:

- حساسات درجة الحرارة تُستخدم لرصد درجات حرارة متعددة داخل المقطر.
- حساسات المسافة تُستخدم لمراقبة كمية الماء المقطر الناتج.
- حساس الرطوبة ضروري لقياس رطوبة الجو.
- حساس تدفق الماء لقياس تدفق الماء المالح الداخل إلى المقطر.
- صمام كهربائي يستخدم لتحكم في تدفق الماء.

الجدول 2-2: مختلف أنواع الحساسات

وصف الحساس	الصورة	اسم الحساس
<p>حساس MAX6675 هو متحكم متخصص مصمم لقراءة درجات الحرارة من ترموكابل نوع K بدقة وسرعة. يقوم MAX6675 بقراءة ورقمنة الإشارة من ترموكابل من النوع K. تُخرج البيانات بدقة 12 بت، يُحسّن هذا المحول درجات الحرارة حتى 0.25 درجة مئوية، ويسمح بقراءات تصل إلى +1024 درجة مئوية. ويُظهر دقة ترموكابل لدرجات حرارة تتراوح من 0 درجة مئوية إلى +700 درجة مئوية وسرعة قراءة 100/ملي ثانية (Maxim Inc, 2021).</p>		<p>حساس درجة الحرارة Max5575</p>
<p>حساس الموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Sensor) هو جهاز إلكتروني يقيس المسافة بينه وبين الأجسام باستخدام موجات صوتية عالية التردد. يعمل على مبدأ انعكاس تلك الموجات. عند تشغيل الحساس، يقوم الجزء المرسل (Transmitter) بإصدار نبضات موجات فوق صوتية قصيرة تنتشر في الهواء، وعندما تصطدم هذه الموجات بأي جسم في مسارها فإنها تنعكس عائدة إلى الجزء المستقبل (Receiver) في الحساس. يقوم الحساس بحساب الفترة الزمنية بين لحظة إرسال الموجة ولحظة استقبال الصدى المنعكس، ثم يحول هذا الزمن إلى مسافة باستخدام العلاقة الفيزيائية البسيطة: المسافة = (السرعة × الزمن) / 2، حيث تمثل السرعة سرعة الصوت في الهواء (حوالي 343 متر/ثانية عند درجة حرارة 20 مئوية)، ويتم القسمة على 2 لأن الموجة تقطع المسافة مرتين (ذهابًا وإيابًا). تمنح هذه التقنية القياس بدقة أقل من 1 سم في قياسات المسافات التي تصل إلى 6 أمتار (Anju, 2016).</p>		<p>حساس المسافة HC-SR04 (Ultrasonic Sensor)</p>

<p>DHT11 من أهم الحساسات المستخدمة في قياس درجة الحرارة والرطوبة مع لوحات الأردوينو. يتميز حساس DHT22 بإخراج إشارة رقمية دقيقة مع معاملات معايرة مخزنة في ذاكرة OTP الداخلية، حيث يحتوي على مقياس رطوبة مقاومي ومقياس حرارة من نوع NTC، مع متحكم دقيق 8-bit مدمج لمعالجة البيانات. يتميز DHT11 باستجابة سريعة وتكلفة منخفضة، رغم أن دقة (<math>\pm 2^{\circ}\text{C}</math> للحرارة و <math>\pm 5\%</math> للرطوبة) (Azhari et al., 2023; Srivastava et al., 2008).</p>		<p>حساس درجة الحرارة والرطوبة DHT11</p>
<p>الصمام الكهرومغناطيسي أو Electrovalve ما يُعرف أيضًا بالصمام الكهرومغناطيسي هو جهاز يُستخدم للتحكم في تدفق السوائل أو الغازات بطريقة آلية من خلال إشارة كهربائية، حيث يعتمد على وجود ملف كهربيائي (solenoid) يولّد مجالاً مغناطيسيّاً عند تمرير التيار، مما يؤدي إلى جذب مكبس داخلي (plunger) يتحكم في فتح أو غلق مسار السائل أو الغاز. ويُعدّ هذا الصمام، المعروف أيضًا باسم الصمام أحادي الاتجاه أو صمام عدم الرجوع، عنصرًا أساسيًا في العديد من أنظمة السوائل التي تتطلب تدفقًا في اتجاه واحد فقط، مما يمنع الرجوع العكسي للسوائل ويحافظ على كفاءة النظام.</p>		<p>صمام كهربيائي electro valve</p>
<p>مستشعر تدفق الماء هو جهاز إلكتروني يُستخدم لقياس سرعة تدفق الماء أو كمية المياه التي تمرّ عبر أنبوب معين خلال فترة زمنية محددة. يُعتبر هذا المستشعر ضروريًا في الأنظمة التي تتطلب مراقبة دقيقة لاستهلاك المياه أو التحكم الأتوماتيكي بتدفقها. يأتي المستشعر مزودًا بثلاثة أسلاك: أحمر (طاقة 5-12 فولت تيار مستمر)، وأسود (أرضي)، وأصفر (مخرج نبضة تأثير هول) (Tahir, 2021).</p>		<p>حساس تدفق الماء Water Flow Sensor</p>

<p>الميزان الإلكتروني المرتبط بالأردوينو هو نظام ذكي يُستخدم لقياس الكتلة وتحويلها إلى إشارات رقمية قابلة للقراءة والمعالجة بواسطة لوحة تحكم مثل Arduino، أين يعتمد على حساس الوزن (Load Cell)، الذي يقوم بتحويل الضغط الناتج عن الكتلة إلى إشارة كهربائية ضعيفة جدًا. هذه الإشارة تُضخَّم بواسطة وحدة خاصة تُسمى HX711، ثم تُرسل إلى لوحة الأردوينو، التي تقوم بتحليلها وعرض القيمة الرقمية للوزن.</p>		<p>الميزان الرقمي balance électronique</p>
<p>مفتاح ميكانيكي، مزود بمغناطيس كهربائي يسحب صفيحة معدنية لتندشيط الدائرة المراد التحكم بها. يُستخدم لعزل وتحكّم في دوائر كهربائية ذات مستويات جهد أو تيار مرتفعة باستخدام إشارة كهربائية ضعيفة.</p> <p>NC: مغلق عادةً، NO: مفتوح عادةً، وC: مشترك.</p>		<p>المرحل Relay</p>
<p>لوحة التجارب (أو اللوح الأولي) هي لوحة مكونة من ثقوب متصلة كهربائيًا داخليًا. يمكن إدخال المكونات والأسلاك الإلكترونية على اللوحة لتجميع الدوائر الإلكترونية.</p>		<p>لوحة التجارب Test plate (Breadboard)</p>

## 2-3-2 الدوائر الإلكترونية وبروتوكولات الاتصال

### 1-2-3-2 برنامج Arduino IDE

برنامج Arduino IDE هو بيئة تطوير برمجية مفتوحة المصدر صُممت خصيصًا لبرمجة لوحات الأردوينو بطريقة سهلة وفعالة، يعمل البرنامج كمحرر أكواد (لغة برمجة مشابهة للغة C). بمجرد كتابة البرنامج أو تعديله على لوحة المفاتيح، يُنقل ويُخزن على اللوحة الأردوينو عبر منفذ USB. يُغذي منفذ USB اللوحة وينقل المعلومات. تتيح بيئة تطوير أردوينو ما يلي:

- تحتوي على محرر نصوص لكتابة الشيفرة البرمجية.

- يقوم البرنامج بترجمة الكود البرمجي إلى لغة الآلة.

- تحميل (نقل) البرنامج إلى ذاكرة أردوينو.

- يحتوي البرنامج على مكتبات برمجية جاهزة.

- يدعم Arduino IDE جميع أنواع لوحات الأردوينو.

### 2-2-3-2 منظومة القياس الآلية

لإنجاز أي مشروع هندسي أو تصميم تجريبي، يجب توصيل مكونات النظام بطريقة منظمة ضمن حلقة مترابطة تُعرف بـ منظومة القياس الآلي، تبدأ عملية البناء بتركيب حلقة إلكترونية متكاملة تضم الحساسات المناسبة، لوحة الأردوينو، ولوحة التجارب (Breadboard)، لتشكيل نظام قابل للبرمجة والرصد الآلي.

في البداية، تُثبت الحساسات الضرورية (مثل حساس الحرارة أو الرطوبة أو الإشعاع) على لوحة التجارب، أو تُوصَل بأسلاك مرنة إذا كانت مستقلة. تُربط هذه الحساسات عبر أسلاك موصلة إلى منافذ الإدخال المناسبة في لوحة الأردوينو، مع مراعاة توصيل خطوط الطاقة (VCC)، الأرضي (GND)، وخط الإشارة (Signal) بدقة.

بعد الانتهاء من التوصيلات، تُوصَل لوحة الأردوينو بالحاسوب عبر كابل USB، الذي يوفر مصدر الطاقة للنظام ويُستخدم كذلك لتحميل البرنامج. يتم تشغيل برنامج Arduino IDE على الحاسوب، وتُحدد اللوحة المستخدمة مثل (Arduino Uno) ومنفذ الاتصال الصحيح (COM Port). يُكتب البرنامج بلغة Arduino C لتنفيذ مهام محددة، كقراءة البيانات من الحساسات كل فترة زمنية محددة (مثل كل ثانية)، وإرسالها إلى الحاسوب عبر الاتصال التسلسلي.

عند الضغط على زر Upload، يقوم البرنامج بترجمة الشيفرة وتحميلها إلى المتحكم على اللوحة. فور انتهاء التحميل، يبدأ تنفيذ البرنامج تلقائيًا، وتُعرض البيانات على شاشة المراقبة التسلسلية (Serial Monitor) داخل بيئة Arduino IDE. يمكن أيضًا تخزين البيانات أو إرسالها إلى وحدات اتصال لاسلكية حسب متطلبات المشروع.

### 3-2-3-2 برنامج Fritzing

هو أداة تصميم مفتوحة المصدر تُستخدم بشكل واسع في مشاريع الإلكترونيات لرسم الدوائر الكهربائية ومخططات التوصيل الواقعية (Breadboard view)، وهو مثالي لتوثيق مشاريع الأردوينو وشرحها بصريًا. يقتصر دور Fritzing في حالة تصميم منظومة القياس الذكية باستخدام الأردوينو في:

- رسم توصيل الحساسات بالأردوينو على لوحة التجارب بطريقة واقعية تشبه التوصيل اليدوي الفعلي.

- إظهار الألوان الحقيقية للأسلاك، وأماكن توصيل كل طرف (VCC، GND، Signal) مما يسهل الفهم والتطبيق.

- توليد مخطط الدارة الكهربائية (Schematic) بشكل أوتوماتيكي.

- تصميم لوحات الدوائر المطبوعة (PCB) إذا تم الانتقال لاحقاً من النموذج التجريبي إلى نموذج صناعي.

- توثيق المشروع بصرياً في التقارير أو العروض الأكاديمية، وهو مفيد جداً للباحثين والطلاب (Fritzing Team, 2025).

### 3-3-2 معالجة البيانات وتصحيح الأخطاء:

بعد جمع البيانات من منظومة القياس الألي، تأتي مرحلة حاسمة تتمثل في معالجة البيانات وتصحيح الأخطاء، بهدف ضمان دقة النتائج، وتحسين موثوقية التحليل النهائي. وتعد هذه المرحلة ضرورية في الأنظمة الحرارية التي تعتمد على القياسات المستمرة، نظراً لاحتمال ظهور تشويش في الإشارات أو قيم شاذة ناتجة عن ظروف بيئية أو أعطال فنية مؤقتة. تشمل هذه المعالجة ثلاث خطوات أساسية: تصفية البيانات، معالجة الإشارات الرقمية، والتحقق من صحة البيانات.

#### ➤ تصفية البيانات

غالباً ما تكون الإشارات القادمة من الحساسات معرضة للتقلبات المفاجئة أو التشويش لذا يتم حساب المتوسط الحسابي لعدد معين من القراءات لتقليل التقلبات المفاجئة، أو فلترة وإزالة ترددات معينة من الإشارة عند الحاجة.

#### ➤ معالجة الإشارات الرقمية

تشمل معالجة الإشارات الرقمية خطوات تحويل البيانات الخام من الحساسات إلى قيم مقروءة ومفسرة هندسياً. على سبيل المثال، يتم تحويل القراءة لحساس حرارة إلى درجة مئوية باستخدام معادلات معايرة داخل الكود. اين تكمن هذه الخطوات في:

- ضبط الإشارات وفق دقة المتحكم.

- تحويل إشارات الحساسات إلى بيانات رقمية داخل الوردوينو.

➤ التحقق من صحة البيانات

بعد تصفية ومعالجة البيانات، يجب التأكد من أن البيانات المُجمعة تعكس الواقع الفعلي للنظام. يتم ذلك من خلال المقارنة بين قراءات متعددة لحساسات متشابهة في نقاط مختلفة، مراقبة التناسق الزمني للتأكد من عدم وجود انقطاعات أو قيم مفقودة وأيضا إعادة المعايرة الدورية للحساسات إذا ظهرت فروقات ثابتة بين القيم المتوقعة والمقاسة.

## 4-2 تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التحسين

### 1-4-2 نماذج تنبؤ الأداء

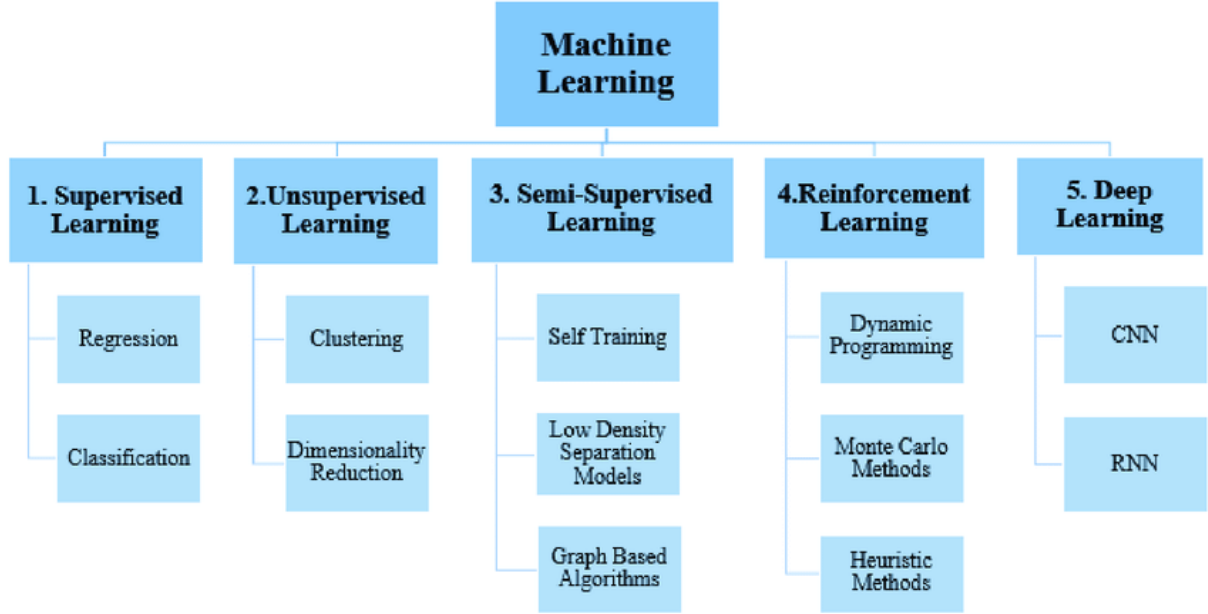
#### 1-1-4-2 الشبكات العصبية الاصطناعية ( – Artificial Neural Networks

(ANN

الشبكات العصبية الاصطناعية هي تقنية مستوحاة من الدماغ البشري، تحاكي نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية النشاط الكهربائي للدماغ والجهاز العصبي. توفر الشبكات العصبية الاصطناعية وسيلة للتعامل مع المشكلات المعقدة وتتميز هذه الشبكات بأنها غير معلمية، مما يتيح بناء النماذج دون الحاجة إلى معرفة مسبقة بتوزيع بيانات العينة أو التفاعلات المحتملة بين المتغيرات، كما هو مطلوب في الطرق الإحصائية المعلمية التقليدية. تتكون الشبكة من عقد مترابطة وغالبًا ما يتم ترتيب هذه العقد في طبقة أو متجه، بحيث يكون ناتج طبقة ما هو مدخلات الطبقة التالية وربما طبقات أخرى (Walczak, 2019).

#### 2-1-4-2 خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning Algorithms)

يستخدم التعلم الآلي لتعليم الآلات كيفية التعامل مع البيانات بكفاءة أكبر. ففي كثير من الأحيان، يصعب علينا تفسير الأنماط أو استخراج المعلومات من البيانات بمجرد النظر إليها. في مثل هذه الحالات، نلجأ إلى تقنيات التعلم الآلي. ومع تزايد حجم وتنوع مجموعات البيانات المتاحة، تزايدت الحاجة إلى استخدام التعلم الآلي. وتستخدم العديد من القطاعات، من الطب إلى المجال العسكري، هذه التقنية لاستخلاص معلومات ذات صلة من البيانات. الهدف الأساسي من التعلم الآلي هو تمكين الأنظمة من التعلم من البيانات. وقد أُجريت العديد من الدراسات حول كيفية جعل الآلات تتعلم ذاتيًا دون تدخل بشري مباشر. ويعمل علماء الرياضيات والمبرمجون على تطوير منهجيات مختلفة لإيجاد حلول فعالة لهذه المشكلة. يوضح الشكل 2-3 أنواع التعلم وتقسيماته الرئيسية (Dey, 2016).



الشكل 2-3: تقسيمات التعلم الآلي (Gayatri et al., 2022)

### 3-1-4-2 تحليل الانحدار المتقدم

تحليل الانحدار المتقدم (Advanced Regression Analysis) هو تطوير وتحسين لأساليب تحليل الانحدار الأساسية بهدف التعامل مع بيانات أكثر تعقيداً أو نماذج تتطلب دقة أكبر في التنبؤ والتحليل. يُستخدم بشكل واسع في مجالات مختلفة وذلك لتحليل العلاقات بين المتغيرات والتنبؤ بالقيم المستقبلية. تتعدد الأنواع والأساليب الشائعة في الانحدار المتقدم منها:

- الانحدار المتعدد (Multiple Regression).
- الانحدار الخطي والغير الخطي (linear and nonlinear Regression).
- الانحدار المعتمد على الزمن (Time Series Regression). (Wang & Jain, 2003).

### 2-4-2 أنظمة التحكم الذكية:

#### 1-2-4-2 التحكم التكيفي في التشغيل (Adaptive Control Systems)

أنظمة التحكم التكيفي مصممة للعمل بكفاءة في بيئات تتسم بعدم اليقين، والاضطرابات، والديناميكيات المتغيرة اين لا تعتمد على وجود نموذج دقيق للنظام مسبقاً، بل تراقب أداء النظام أثناء التشغيل، وتقوم بتعديل معلمات وحدة التحكم تلقائياً في الزمن الحقيقي لمواكبة التغيرات أو الاضطرابات في

البيئة أو خصائص النظام نفسه. تُستخدم هذه الأنظمة عندما يكون سلوك النظام غير معروف بالكامل أو يتغير بمرور الوقت.

يتكوّن نظام التحكم التكييفي عادة من ثلاثة مكونات رئيسية:

✓ النموذج المرجعي (Reference Model): وهو يحدد السلوك المثالي أو الناتج الذي يجب أن يتبعه النظام، ويُستخدم كمعيار لمقارنة الأداء الفعلي للنظام.

✓ وحدة التحكم (Controller): تُعدل المدخلات لضمان أن سلوك النظام يطابق النموذج المرجعي، وتمتلك القدرة على تعديل معاييرها ذاتيًا بناءً على التغذية الراجعة.

✓ آلية تعديل المعلمات (Parameter Adjustment Mechanism): وهي جوهر النظام التكييفي، حيث تقوم بمراقبة أداء النظام باستمرار وضبط معايير وحدة التحكم لتقليل الفرق بين الناتج الفعلي والمثالي (Zohuri, 2024).

## 2-2-4-2 أنظمة التحكم الأمثل (Optimal Control Systems)

تُعد أنظمة التحكم الأمثل (Optimal Control Systems) من أهم الأدوات الهندسية في تصميم أنظمة قادرة على تحقيق أفضل أداء ممكن ضمن شروط تشغيل محددة. تهدف هذه الأنظمة إلى تحديد إجراءات التحكم التي تؤدي إلى تحسين أداء النظام وفقًا لهدف معين، مثل تعظيم الكفاءة، تقليل الطاقة المستهلكة...، أين تعتمد أنظمة التحكم الأمثل على مبدأ اختيار أفضل إجراء تحكم عند كل لحظة زمنية لتحقيق هدف معين، مثل تقليل استهلاك الطاقة أو تعظيم الإنتاج، مع احترام القيود التشغيلية للنظام. تبدأ العملية بتحديد دالة الهدف رياضياً، تليها نمذجة سلوك النظام باستخدام معادلات تصف العلاقة بين المدخلات والمخرجات. بعد ذلك، تُحدد القيود الفيزيائية أو التقنية لكل متغير باستخدام خوارزميات تحسين متقدمة حيث يتم حساب سلسلة قرارات أو إشارات تحكم تحقق الأداء الأمثل. تُنفذ هذه الإشارات في الزمن الحقيقي مع مراقبة مستمرة لحالة النظام (Jo'rayev et al., 2023).

أثبتت تقنيات الذكاء الاصطناعي فعاليتها في تحسين أداء المقطرات الشمسية من خلال تحليل البيانات التشغيلية الضخمة والتفاعل الذكي مع الظروف البيئية المتغيرة. فمن خلال النماذج التنبؤية المبنية على الشبكات العصبية الاصطناعية أو خوارزميات التعلم الآلي، يمكن توقع أداء النظام مثل كمية الماء المقطر أو الكفاءة الحرارية بناءً على بيانات مدخلة تشمل الإشعاع الشمسي، درجات الحرارة، والرطوبة. يسمح ذلك باتخاذ قرارات استباقية مثل ضبط توقيت التشغيل أو تغيير زوايا الميل لتحقيق أقصى إنتاجية.

كما أن تحليل الانحدار المتقدم يوفر أدوات كمية لفهم العلاقات بين المتغيرات، مما يُسهّل تعديل التصميمات أو تحسين العزل الحراري استنادًا إلى التأثير الحقيقي لكل عامل.

أما من جهة التشغيل، فتتيح أنظمة التحكم الذكية (سواء التكيفية أو المثلى) تعديل استجابات النظام لحظيًا، مثل تنشيط المراوح أو مضخات التبريد عند الحاجة، أو إعادة توجيه مكونات النظام لتحسين عملية التكثيف. يمكن أيضًا استخدام الذكاء الاصطناعي في جدولة الصيانة، أو التنبؤ بحدوث أعطال في الحساسات.

هذه التطبيقات تساهم في رفع كفاءة الطاقة، تقليل الفاقد، وزيادة استدامة المقطر، مما يُعزز من جدوى استخدامه في مناطق تعاني من نقص الموارد المائية أو الطاقة. من بين العديد من الأبحاث المدروسة ناقش (Elgendi & Atef, 2023) التحديات المرتبطة بتحديد تأثير كل من معايير الأرصاد الجوية والطاقة الشمسية الثابتة على إنتاجية المقطر الشمسي، بسبب الارتباط بين هذه المعايير وصعوبة عزل تأثير كل منها تجريبيًا. استخدم الباحث خوارزمتين، هما الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) والانحدار الخطي (LR)، لتوقع إنتاجية المقطر الشمسي. وحدد أربعة معايير رئيسية مؤثرة (Solar، Tf، Tout، و Wind)، مما ساعد في تقليل تعقيد نموذج ANN بنسبة 72٪ وتفوقه على نموذج LR من حيث الدقة، ما يبرز كفاءته في نمذجة الأنظمة غير الخطية، ويُسهّم هذا في تحسين اختيار المعايير والمواقع لزيادة كفاءة المقطرات الشمسية. وفي بحث آخر اقترح (Nazari et al., 2020) دمج خوارزمية "المنافسة الإمبريالية (ICA)" مع الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) لتشكيل نموذج ICA-ANN، بهدف التنبؤ بإنتاجية وكفاءة الطاقة والإكسيري (exergy) لمقطر شمسي أحادي الميل. استخدم النموذج ستة مدخلات: درجة حرارة الهواء والماء والحوض والزجاج، إضافة إلى الإشعاع الشمسي والزمن. لم يتضمن النموذج تأثير سرعة الرياح أو أي تعديلات تصميمية، إذ ركزت الدراسة بشكل أساسي على تقييم أداء خوارزمية ICA. تمت مقارنة أداء نموذج ICA-ANN مع النموذج الأساسي للـ ANN باستخدام معامل التحديد ( $R^2$ ) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE). وأظهرت النتائج أن النموذج الجديد قلل من MAE بنسبة 40,11% للإنتاجية، و53,35% لكفاءة الإكسيري، و54,3% لكفاءة الطاقة، مقارنة بالنموذج الأساسي. كما تحسّن معامل  $R^2$  ليصل إلى 0,9928، 0,9689، و0,9924 على التوالي، مسجلًا زيادات بمقدار 0,0186، 0,045، و0,028 مقارنة بالنموذج التقليدي. في سياق مشابه، قام (Chauhan et al., 2020) باختبار ست خوارزميات مرتبطة بنموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)، وهي: الانتشار العكسي المرن، خطوة واحدة سيكانت، التدرج المتوافق مع إعادة تشغيل باول-بيل، تحديث فليشر-ريفز، خوارزمية ليفنبرغ-ماركوارت (LM)، وخوارزمية التدرج المتوافق المصغرة. استخدموا مدخلين رئيسيين في طبقة الإدخال وهما: درجة حرارة الماء والزجاج، بهدف اشتقاق الخصائص الترموفيزيائية للهواء داخل المقطر الشمسي. وتضمنت المخرجات خصائص مثل الكثافة، حرارة التبخر، الحرارة النوعية، التوصيل الحراري، اللزوجة الديناميكية، والضغط الجزئي عند سطح الماء والزجاج.

أظهرت النتائج أن خوارزمية LM حققت أدنى قيمة لخطأ الجذر التربيعي المتوسط (RMSE)، حيث لم تتجاوز 0,0039، في حين سجلت خوارزمية باول-بيل أعلى قيمة RMSE بلغت 0,0445. كما حققت LM أعلى كفاءة، حيث بلغ معامل الكفاءة لديها القيمة القصوى 1، ولم يقل عن 0,9941 في خصائص مثل الضغط الجزئي عند سطح الزجاج واللزوجة الديناميكية، ووصل معامل التحديد الكلي ( $R^2$ ) إلى نحو 0,99994، ما يدل على دقة عالية جدًا في التنبؤ. بالإضافة إلى (Sohani et al., 2022a) قدم نموذجًا لمقطر شمسي نشط مزود بمجمّع شمسي من نوع الصفیحة المسطحة، وحقق إنتاجية يومية بلغت 6.92 لتر/م<sup>2</sup>. تميز تصميم المجمّع بعجلات أمامية وخلفية تتيح تعديل زاوية الميل لتحقيق أفضل امتصاص شمسي. استخدم الباحثون ثلاثة نماذج من الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتوقع إنتاجية الماء المقطر ودرجة حرارة الماء، وهي: الشبكة ذات دالة القاعدة الشعاعية (RBF)، الانتشار العكسي، والشبكة التقدمية (feedforward). أظهرت النتائج أن نموذج feedforward كان الأكثر دقة في توقع الإنتاجية، حيث بلغ معامل التحديد ( $R^2$ ) 0,9631 ومتوسط الخطأ المطلق (MAE) 3,56، بينما كانت RBF الأفضل في توقع درجة حرارة الماء، محققة  $R^2$  بقيمة 0,9771 و MAE قدره 2,82. يقدم الجدول 2-3 ملخصًا للنتائج التي توصلت إليها بعض الدراسات السابقة.

الجدول 2-3: مقارنة بين دراسات حديثة حول استخدام نماذج التعلم الآلي في التنبؤ بأداء المقطرات الشمسية

R <sup>2</sup>	MES/RMSE	نموذج التعلم الآلي	نوع المقطر الشمسي	مرجع
0.999959	2.193044	ANN, ANFIS, and SVM	مقطر شمسي نصف كروي	(Bamasag et al., 2022)
-	0.163- 0.011	multilayer ANN with an improved genetic algorithm	مقطر شمسي نصف كروي	(Ashraf et al., 2023)
-	0.0299–0.0546	multilayer ANN with Levenberg Marquardt algorithm	مقطر شمسي أحادي الميل	(Chauhan et al., 2022)
0.999	0.098 - 0.099	Support vector machine	مقطر شمسي أحادي الميل	(Elsheikh et al., 2022)
0.9999	0.0002	Support vector machine	مقطر شمسي أحادي الميل	(Zayed et al., 2022)
0.977057	2.82	Radial basis function	مقطر شمسي أحادي الميل	(Sohani et al., 2022b)
0.9703	70.53	Harris Hawks	مقطر شمسي أحادي الميل	(Essa et al., 2020)
0.991	0.008	Ensemble random vector functional link	مقطر شمسي أحادي الميل	(Abd Elaziz, Essa, et al., 2021)
0.96	0.047	Back-propagation ANN	مقطر شمسي مائل	(Mashaly & Alazba, 2017b)
0.9367	0.0871	Adaptive neuro-fuzzy inference	مقطر شمسي مائل	(Mashaly & Alazba, 2017a)

-	5.43- 5.74	Decision Tree	مقطر شمسي أحادي الميل	(Murugan et al., 2023a)
0.999	0.415	Linear Regression	مقطر شمسي أحادي الميل	(Hosseinifard et al., 2025)
0.99	0.001227	Artificial Neural Network	مقطر شمسي أحادي الميل	(Özcan et al., 2025)
0.953– 0.999	-	triangulation topology aggregation optimizer	مقطر شمسي كروي	(Elaziz et al., 2024)

## 5-2 التحليل الاقتصادي والاستدامة

يُعد تقييم الجوانب الاقتصادية والبيئية لأي نظام تقني خطوة أساسية لضمان قابليته للتطبيق العملي على نطاق واسع، خاصةً في مجالات تحليلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية. فإلى جانب الكفاءة الفنية، من الضروري تحليل تكلفة الإنشاء والتشغيل، وفترة استرداد الاستثمار، ومدى تفوق النظام مقارنةً بالبدائل التقليدية من حيث الجدوى المالية.

إضافة إلى ذلك، فإن توجهات التنمية المستدامة تتطلب تقييمًا بيئيًا دقيقًا يشمل البصمة الكربونية، ودورة حياة المكونات، وتأثير المواد المستخدمة على البيئة. ويكمل هذا التحليل بتحديد مؤشرات الأداء المستدام، مثل كفاءة استهلاك الطاقة، والامتثال لأهداف الاستدامة العالمية.

### 1-5-2 التقييم الاقتصادي:

يُعد التحليل الاقتصادي أحد الركائز الأساسية لتقييم جدوى تطبيق المقطر الشمسي، حيث يكون من الضروري دراسة العلاقة بين تكلفة الاستثمار الأولي والعائد المتوقع على المدى الطويل. يشمل التقييم تحليل تكلفة التصنيع، التركيب، التشغيل، الصيانة، بالإضافة إلى العمر الافتراضي للمكونات.

### 1-1-5-2 تحليل التكلفة (Cost Analysis)

في حالة التحليل التكلفة، فإن المقياس والعامل الرئيسي هو التكلفة لكل لتر. ولإجراء مثل هذا التحليل، يتم استخدام التكلفة الإجمالية لجهاز التقطير (Ps)، وقيمة الإنقاذ السنوية (ASV)، ومعامل صندوق الاستهلاك (SFF)، وتكلفة الصيانة السنوية (AMC)، وسعر الفائدة السنوي (i) باستخدام معادلات محددة. يتم إعطاء معامل استرداد رأس المال (CRF) كدالة على الفائدة السنوية (i) وعدد سنوات عمر النظام (n) في المعادلة 2-8 (Abo-Elfadl et al., 2021; Hassan et al., 2021).

معادلة 2-8

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

يمكن تحديد التكلفة السنوية الثابتة (FAC) بالدولار وعامل صندوق الاستهلاك (SFF) من المعادلات (معادلة 2-9 و معادلة 2-10) (Anika et al., 2024a).

معادلة 2-9

$$FAC = Ps \times CRF$$

معادلة 2-10

$$SFF = \frac{i}{[(1+i)^n - 1]}$$

يتم تقدير قيمة الإنقاذ (SV) بالدولار والقيمة السنوية للإنقاذ (ASV) بالدولار باستخدام (معادلة 2-11 و معادلة 2-12) (Pandey & Naresh, 2024).

معادلة 2-11

$$SV = 0,2 \times Ps$$

معادلة 2-12

$$ASV = SFF \times SV$$

AMC هي تكلفة الصيانة السنوية بالدولار، و TAC هي التكلفة السنوية الإجمالية بالدولار، ويمكن حسابهما باستخدام معادلة 2-13 و معادلة 2-14 (Tuly et al., 2022):

معادلة 2-13

$$AMC = 0,15 \times FAC$$

معادلة 2-14

$$TAC = (FAC + AMC - ASV)$$

ثم يتم تقدير تكلفة إنتاج المياه العذبة لكل لتر باستخدام المعادلة 2-15 (Tuly et al., 2022)

معادلة 2-15

$$CPL = TAC/M$$

حيث M هو متوسط الإنتاج السنوي بالكيلوجرام/م<sup>2</sup>.سنة.

### 2-1-5-2 تحليل Exergo-economic

التحليل Exergo-economic هو نوع من التحليل الاقتصادي الذي يجمع بين تحليل الإكسرجي وتحليل التكاليف بهدف تحسين أداء أنظمة الطاقة المتجددة. يهدف هذا التحليل إلى زيادة كفاءة هذه الأنظمة من خلال تقليل فاقد الإكسرجي مع الأخذ بعين الاعتبار التكاليف المرتبطة بذلك. وتعد هذه التقنية مفيدة في تحديد أفضل التصاميم واستراتيجيات التشغيل من حيث الكفاءة الاقتصادية لأنظمة الطاقة المتجددة. يتم حساب معامل Exergo-economic بوحدة ك.واط ساعي/دولار باستخدام معادلة 2-16 (Pandey & Naresh, 2024).

$$\text{معادلة 2-16} \quad R_{ex} = \frac{E_{ex,out}}{TAC}$$

### 3-1-5-2 فترة الاسترداد (Payback Period)

فترة الاسترداد هي مقياس مالي يُستخدم لتحديد الوقت اللازم لاسترداد الاستثمار الأولي، حيث تعتمد فترة استرداد جهاز التقطير الشمسي على عدة عوامل مثل تكاليف التصنيع، الصيانة، التشغيل، وتكلفة مياه البحر الداخلة. ويتم حسابها باستخدام المعادلة 2-17، المعادلة 2-18 والمعادلة 2-19. هنا، تشير P إلى تكلفة رأس المال بالدولار (Anika et al., 2024a; Tuly et al., 2022).

$$\text{معادلة 2-17} \quad \text{سعر الماء في السوق} = 0,27 \quad (\text{دولار/لتر})$$

$$\text{معادلة 2-18} \quad \text{سعر السوق} \times \text{متوسط العائد} = \text{الربح} \quad (\text{دولار/م}^2/\text{اليوم})$$

$$\text{معادلة 2-19} \quad \text{الربح/تكلفة رأس المال} = \text{مدة الاسترداد} \quad (\text{اليوم})$$

### 2-5-2 تحليل الاستدامة:

يجب على أي نظام يعتمد على الطاقة المتجددة أن يفحص مصفوفته الطاقية، والتي يمكن اعتبارها من أبسط أدوات اتخاذ القرار. تعتبر المصفوفات الطاقية ضرورية لأنها تُظهر ما إذا كان من المنطقي استخدام مصادر الطاقة المتجددة أم لا، وذلك لأنها توضح مقارنة بين الطاقة المستخدمة أثناء الإنتاج والطاقة التي يجمعها النظام خلال فترة تشغيله. في هذا القسم، يتم حساب عامل إنتاج الطاقة (EPF) ومدة استرداد الطاقة (EPBT) كمعيارين من معايير المصفوفة الطاقية لجهاز التقطير الشمسي المعدل.

### 1-2-5-2 فترة استرداد الطاقة (EPT) وعامل إنتاج الطاقة (EPF)

يمكن وصف معيار مدة استرداد الطاقة (EPBT) باستخدام منهجية الطاقة والإكسرجي، ويُعرّف على أنه مقدار الوقت اللازم لاسترداد الطاقة الكامنة في نظام التقطير الشمسي (Parsa, Rahbar, Javadi, et al., 2020). يمكن حساب مدة استرداد الطاقة وعامل إنتاج الطاقة باستخدام المعادلة 2-20 و المعادلة 2-21 (Pal et al., 2018):

$$\text{معادلة 2-20} \quad EPT_{en} = \frac{E_{im}}{En_{out,ann}}$$

$$\text{معادلة 2-21} \quad EPF_{en} = \left[ \frac{E_{im}}{En_{out,ann}} \right]^{-1}$$

حيث إن  $E_{im}$  تمثل الطاقة الكامنة، و  $En_{out,ann}$  تعبّر عن مخرجات الطاقة خلال العمر التشغيلي لجهاز التقطير الشمسي. يمكن استخدام المعادلة 2-22:

$$\text{معادلة 2-22} \quad En_{out,ann} = \frac{\dot{m}_w \times L_v}{\Delta t}$$

### 2-2-5-2 مؤشر الاستدامة (Sustainability index)

يتم تقييم كفاءة استخدام النظام للموارد من خلال مؤشر الاستدامة (SI)، أي أنه مقياس يُظهر مدى كفاءة استغلال الموارد. وبالاستناد إلى كفاءة الإكسرجي، يتم تحديد هذا المؤشر وفقاً للمعادلة 2-23 (R. Hassan et al., 2021):

$$\text{معادلة 2-23} \quad SI = \frac{1}{1 - \eta_{ex}}$$

تتراوح قيمة مؤشر الاستدامة من 1 إلى  $\infty$  ويمكن أن تكون أي عدد صحيح موجب.

### 3-5-2 التحليل البيئي (Environmental analysis)

يُعد التحليل البيئي مؤشرًا مناسبًا لتقدير كمية ثاني أكسيد الكربون التي تم تقليلها بفضل أنظمة التقطير الشمسي، وهو جانب مهم ينبغي أخذه بعين الاعتبار إلى جانب التحليلين الطاقوي والاقتصادي لأي نظام طاقة مقترح، إذ يجب أن يعود هذا النظام بالنفع على البيئة أيضًا. يتم احتساب كمية ثاني أكسيد الكربون المُخفّضة سنويًا باستخدام هذه التقنية، ولكن رغم هذه الفوائد البيئية، لا توجد حتى الآن أسواق أو قنوات لتسويق أرصدة الكربون الناتجة عن هذه الأنظمة. ويُعتمد في هذا الأسلوب على افتراض أن النظام يعمل بالكامل بالطاقة المتجددة، مثل أنظمة التقطير الشمسي. ومع ذلك، فإن المواد المستخدمة في تصنيع هذه الأنظمة المستندة إلى الطاقة المتجددة تُستخرج من مصادر أحفورية تسبب تلوثًا بيئيًا، مما يستوجب أيضًا تقييم تأثير هذه الملوثات إلى جانب الفوائد البيئية. ويُطلق على كمية الطاقة المستخدمة في تصنيع كل مكون من مكونات نظام التقطير الشمسي مصطلح "الطاقة الكامنة"، والتي يجب أخذها في الحسبان عند تقييم الأثر البيئي الكامل للنظام (Yousef & Hassan, 2020).

#### 1-3-5-2 انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO2 emission)

يبلغ متوسط شدة مكافئ ثاني أكسيد الكربون للكهرباء المنتجة من محطات الطاقة التي تعتمد على الوقود الأحفوري ي بنحو 2 كغم من CO<sub>2</sub> لكل كيلوواط ساعة (Yousef & Hassan, 2019). ولتقييم انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على مدى عمر جهاز التقطير، يتم استخدام المعادلة 2-24 (Khan et al., 2023).

معادلة 2-24

$$\psi_{CO_2} = \frac{E_{im} \times 2}{n}$$

حيث يشير كلٌّ من  $E_{im}$  و  $n$  إلى الطاقة الكامنة وعمر جهاز التقطير، على التوالي. تُعدّ الطاقة المتجسدة عنصرًا حيويًا، وتُحدّد على أنها حاصل ضرب كتلة كل عنصر في جهاز التقطير مع كثافات الطاقة الخاصة به،

#### 2-3-5-2 التخفيف من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO2 emission)

##### (mitigation)

يتم تحديد التخفيف الإجمالي لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون على مدار عمر المقطر باستخدام المعادلة 2-25، حيث يشير Eout إلى الناتج السنوي للطاقة من جهاز التقطير (Khan et al., 2023).

معادلة 2-25

$$\xi_{CO_2} = \frac{[(E_{out} \times n) - E_{im}] \times 2}{1000}$$

### 3-3-5-2 رصيد الكربون المكتسب (Carbon credit earned CCE)

تساعد المعايير البيئية في تحديد رصيد الكربون المكتسب من خلال تخفيف انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من البيئة، ويُقدَّر على النحو التالي معادلة 2-26 (Khan et al., 2023):

معادلة 2-26

$$CCE = \xi_{CO_2} \times z = \frac{[(E_{out} \times n) - E_{im}] \times 2 \times z}{1000}$$

حيث  $Z$  تمثل تكلفة تداول ثاني أكسيد الكربون لكل طن ، اين يتراوح سعر الكربون حالياً في الأسواق العالمية بين 13 و16 دولاراً أمريكياً للطن. ونتيجةً لذلك، قرر الخبراء أن متوسط سعر مناسب يبلغ 14.5 دولاراً أمريكياً للطن من الكربون (Yousef & Hassan, 2019).

## 6-2 الخاتمة

في ختام هذا الفصل، تبين أن المقطر الشمسي لا يمثل مجرد حل بيئي لمشكلة ندرة المياه، بل يُعد نظاماً قابلاً للتطوير والتحسين من خلال توظيف أدوات القياس الذكية وتقنيات الذكاء الاصطناعي. لقد أتاح استخدام نظام الأردوينو إمكانية رصد البيانات التشغيلية بدقة عالية، مما وفر أساساً متيناً لتحليل الأداء وتحديد نقاط الضعف. كما ساهمت تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تعزيز القدرة التنبؤية والتحكم الذاتي في ظروف التشغيل، وهو ما انعكس إيجاباً على الكفاءة والإنتاجية. ومن خلال النمذجة والمحاكاة العددية، تم التحقق من سلوك النظام تحت ظروف متعددة، مما أتاح فهماً أعمق لآليات النقل الحراري وحركية البخار داخل المقطر. أما التحليل الاقتصادي فقد كشف عن إمكانات حقيقية لتحقيق جدوى مالية، لا سيما عند دمج تقنيات الاستدامة وتحسين تصميم النظام. وعليه، يمثل هذا الفصل قاعدة علمية وتقنية مهمة للانتقال إلى مراحل أكثر تقدماً في تطوير وتطبيق المقطرات الشمسية في البيئات الصحراوية وشبه القاحلة.

# الفصل 3: الدراسة التجريبية لأداء المقطر الشمسي

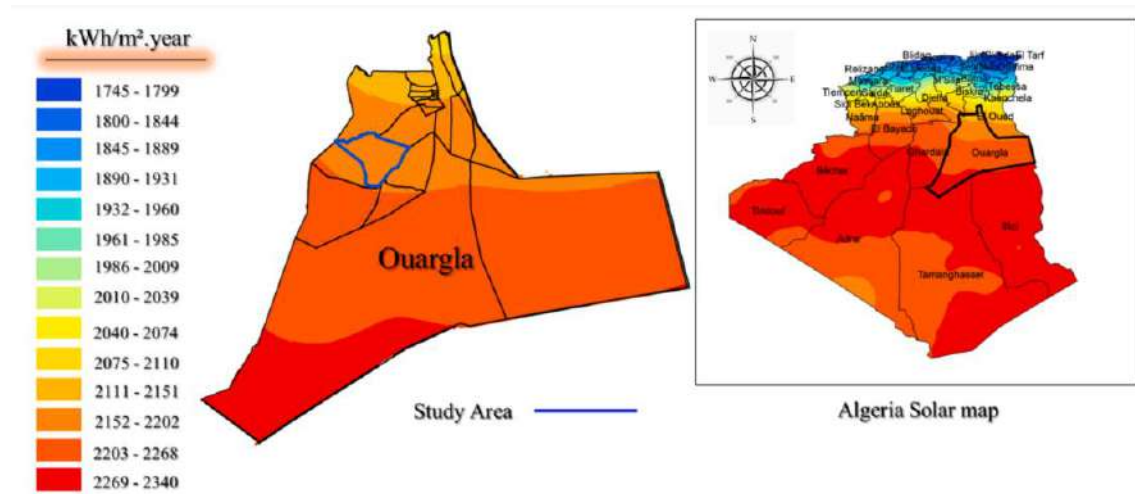
### 1-3 المقدمة

تُعد التجارب الميدانية خطوة محورية في الربط بين النتائج النظرية من جهة، والسلوك الفعلي للنظام من جهة أخرى، حيث تُمكن من قياس المتغيرات الحرارية والبيئية وتحليلها. يتناول هذا الفصل عرضاً منهجياً للأعمال التجريبية التي أُجريت بهدف دراسة أداء المقطر الشمسي تحت ظروف تشغيل واقعية. مع التركيز على تأثير التعديلات التصميمية والتكنولوجية على الكفاءة والإنتاجية. وقد تم تنفيذ سلسلتين من التجارب العملية باستخدام مقطرات شمسية من نوع أحادي الميل، وذلك ضمن بيئة مناخية طبيعية.

يسعى هذا الفصل إلى عرض تفاصيل التصميم والتجهيزات، منهجيات القياس، شروط التجربة، وتحليل النتائج المُجمعة، مع مقارنة الأداء بين النماذج التقليدية والمحسّنة، واستقراء تأثير كل تعديل على كفاءة النظام الكلية.

### 2-3 منطقة الدراسة

تم تصميم واختبار المقطرات الشمسية في فترات زمنية مختلفة، حيث أُجريت التجارب بمدينة ورقلة، الواقعة في الجنوب الشرقي من الجزائر الشكل 3-1، عند خط عرض  $31.93^\circ$  شمالاً وخط طول  $5.30^\circ$  شرقاً، وعلى ارتفاع يبلغ حوالي 141 متراً فوق مستوى سطح البحر (Settou et al., 2022).



الشكل 3-1: خريطة الجزائر وموقع ورقلة (Settou et al., 2022)

تتميز منطقة ورقلة بمناخ صحراوي قاري شديد الحرارة والجفاف، حيث تسجّل درجات حرارة مرتفعة صيفاً تتجاوز غالباً  $45^\circ\text{C}$ ، مع نسبة رطوبة منخفضة تقل عن 20% في معظم أيام السنة، وقيمة إشعاع شمسي عالية تتراوح بين 6 إلى  $7.5 \text{ kWh/m}^2$  يومياً، ما يجعلها بيئة مثالية لاختبار أنظمة التحلية بالطاقة الشمسية. كما

أن قلة الغيوم وسطوع الشمس طوال العام يعززان من ثبات الظروف التجريبية، وهو ما يُعد عاملاً مهمًا لتحليل أداء المقطر بدقة وموثوقية.

### 3-3 التجربة الأولى: دراسة تأثير اللوحة المعدنية الداخلية

تهدف التجربة الأولى إلى تقييم تأثير إدخال عنصر مركز للإشعاع الشمسي على إنتاجية النظام. شملت التجربة مقارنة بين نموذجين من المقطرات الشمسية: الأول تقليدي، يمثل النموذج المرجعي، والثاني محسن من خلال إضافة لوحة معدنية موضوعة أعلى الحوض مغطاة بغطاء زجاجي، تعمل على تركيز الإشعاع الشمسي وزيادة كفاءة التبخر. أجريت التجربة في 5 جويلية 2023 بالمدرسة العليا للأساتذة.

تم خلال هذه التجربة قياس الإنتاجية اليومية يدويًا وتحليل البيانات الناتجة من حيث الأداء الحراري والجدوى الاقتصادية. وقد جاءت هذه الدراسة لتحديد ما إذا كان تحسين التصميم الهيكلي للمقطر ينعكس فعليًا على الأداء العام للنظام من حيث الكفاءة والتكلفة.

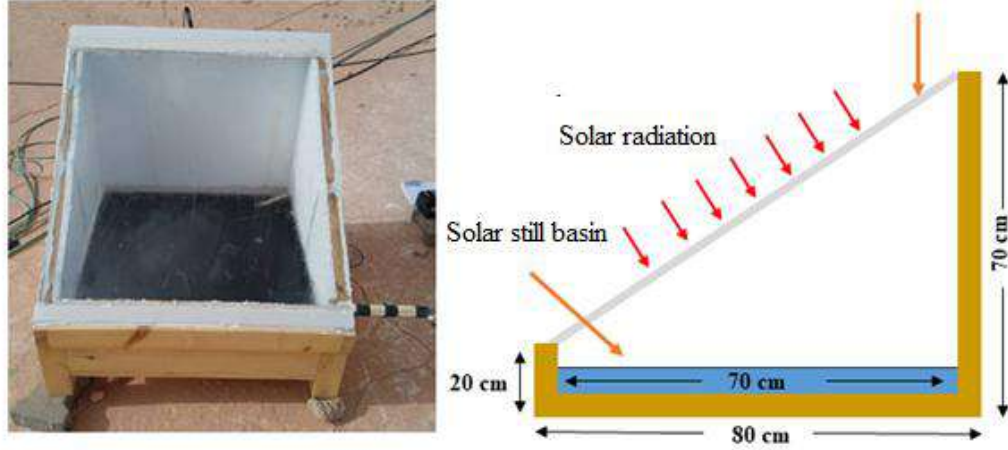
### 1-3-3 المنهجية التجريبية

في هذا العمل التجريبي، تم اختبار نوعين من المقطرات الشمسية الأولى شاهد TSS والثاني محسن ISS وقد تم تصميم كل منهما بأبعاد ومواد مختارة بعناية، بهدف دراسة تأثير التعديل التصميمي على كفاءة النظام وأدائه الحراري.

أولاً: المقطر الشمسي التقليدي (TSS):

يتكوّن هذا النموذج من حوض تبخير معدني مصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ (Inox)، بأبعاد 70 سم × 70 سم وارتفاع 4 سم، تم طلاؤه باللون الأسود غير اللامع لتعزيز امتصاص الإشعاع الشمسي.

الحوض موضوع داخل إطار خشبي معزول بأبعاد 80 سم × 80 سم، وارتفاع 20 سم، وسُمك جدار 3 سم. لزيادة العزل الحراري، تم ملء الفراغ بين الحوض والإطار بمادة البوليسترين، المعروفة بفعاليتها في تقليل الفواقد الحرارية. يُغطي الجزء العلوي للمقطر غطاء زجاجي شفاف بسماكة 4 ملم وأبعاد 79 سم × 79 سم، مائل بزاوية 31 درجة لتسهيل انزلاق قطرات التكثيف نحو قناة التجميع. يبلغ الارتفاع الكلي للمقطر 70 سم. كما هو مبين في الشكل 2-3. يهدف هذا التصميم إلى تحسين امتصاص الطاقة الشمسية وتقليل الفواقد، مع توفير ميل مناسب لتكثيف البخار على الزجاج.



الشكل 3-2: رسم تخطيطي للمقطر الشمسي التقليدي

ثانياً: المقطر الشمسي المحسن (ISS) المتصل بمجمع شمسي

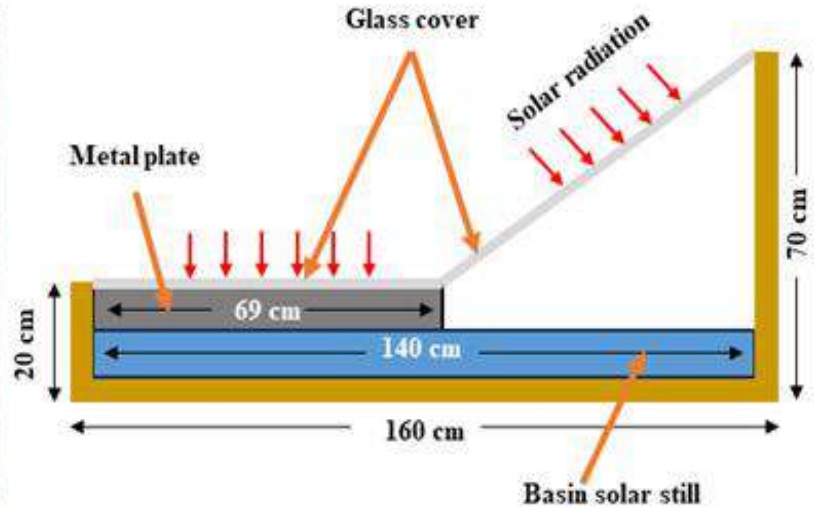
كما هو موضح في الشكل 3-3، يتكون هذا النموذج من وحدة مزدوجة الوظيفة تجمع بين مقطر ومجمع شمسي في بنية واحدة. يحتوي على حوض تبخير طويل بأبعاد 140 سم × 70 سم وارتفاع 4 سم، مصنوع كذلك من الفولاذ المقاوم للصدأ، موضوع داخل إطار خشبي معزول بسمك 3 سم، بأبعاد 160 سم × 80 سم وارتفاع 20 سم، مع طبقة عزل بوليسترين.

تم تقسيم الحوض إلى قسمين:

القسم الأول: مقطر أحادي الميل مطابق من حيث التصميم للمقطر التقليدي (أبعاد الحوض 70 × 70 سم، وغطاء زجاجي مائل بزاوية 31°) (Slimani et al., 2024).

القسم الثاني: مجمع شمسي يحتوي على صفيحة معدنية سوداء (Inox) بأبعاد 69 سم × 69 سم وارتفاع 4 سم موضوعة مباشرة فوق الحوض، ومغطاة بزجاج شفاف مائل للأول.

تسقط أشعة الشمس على النظام المزدوج فتُسخن المياه مباشرة في القسم الأول (المقطر)، بينما تقوم الصفيحة المعدنية في القسم الثاني بامتصاص الحرارة ونقلها إلى المياه في الحوض من أسفلها، مما يُعزز عملية التبخر. الهدف من هذا التعديل هو زيادة كمية الطاقة الحرارية المتاحة داخل الحوض، وبالتالي رفع كفاءة المقطر وإنتاجيته مقارنة بالنموذج التقليدي.



الشكل 3-3: رسم تخطيطي للمقطر الشمسي المحسن

### 2-3-3 أجهزة القياس والمعايير التجريبية

خلال تنفيذ التجارب الميدانية، تم قياس عدد من المعايير الأساسية بهدف تقييم الأداء الحراري والإنتاجي لكل من المقطر الشمسي التقليدي والمحسن. وقد استُخدمت مجموعة من أجهزة القياس الدقيقة والمناسبة لطبيعة النظام، لضمان دقة البيانات التجريبية ومصداقية النتائج الشكل 3-4.

تم استخدام جهاز قياس الإشعاع الشمسي (Solarimeter) لقياس شدة الإشعاع الشمسي اللحظي، وذلك عند نفس مستوى الغطاء الزجاجي العلوي للمقطر، بهدف مطابقة ظروف الإضاءة بين النماذج. كما تم قياس سرعة الرياح باستعمال (Anemometer) و أيضا تحديد إنتاجية المياه العذبة الناتجة عن التقطير بقياس الكمية اليومية المُجمعة باستخدام ميزان إلكتروني حساس (Digital Balance)، يُسجل بدقة كتلة الماء المقطر في كل تجربة. بالنسبة إلى درجة الحرارة، فقد تم استخدام مزدوجات حرارية من النوع (K-type K) (thermocouples) ، نظراً لدقتها العالية واستقرارها في البيئات الحرارية القاسية. تم توزيع هذه الحساسات على عدة نقاط استراتيجية تشمل:

- درجة حرارة الماء داخل الحوض  $T_w$
- درجة حرارة السطح الزجاجي الداخلي  $T_g$
- درجة حرارة الصفیحة المعدنية  $T_{metal}$
- ودرجة حرارة الهواء الخارجي (المحيط)  $T_{amb}$



جهاز قياس الإشعاع الشمسي Solarimete      جهاز قياس سرعة الرياح Anemometer

جهاز قياس درجة الحرارة thermocouple      ميزان الكتروني Digital Balance

الشكل 3-4: اجهزة القياس المستعملة في التجربة الأولى

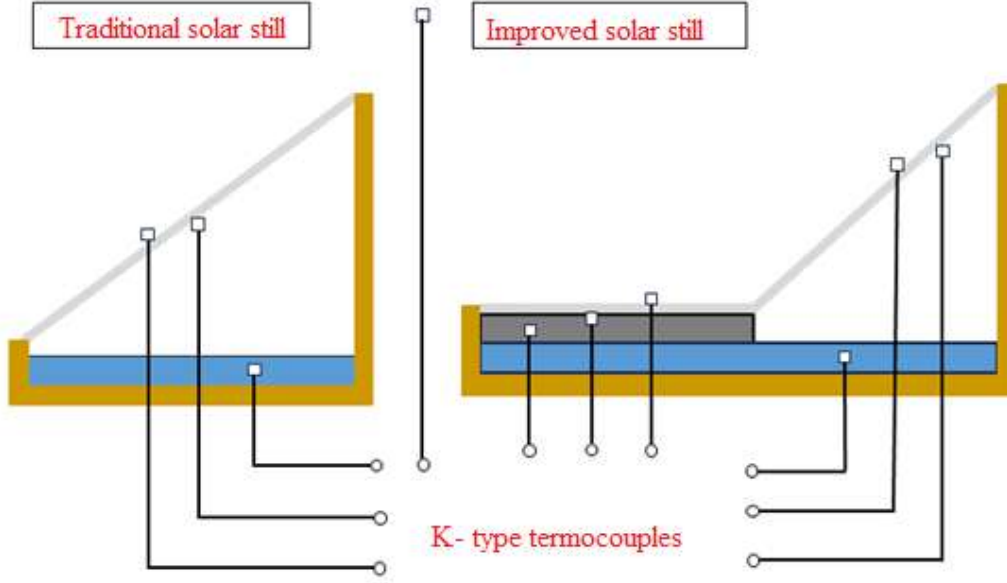
يعرض الجدول 3-1 خصائص أجهزة القياس المعتمدة في الدراسة، والتي تم أخذها بعين الاعتبار في تحليل النتائج.

الجدول 3-1: خصائص أجهزة القياس

الجهاز	الدقة	المدى	عدم اليقين
مقياس الإشعاع الشمسي	1 W / m <sup>2</sup>	0 - 1999 W / m <sup>2</sup>	0.577
مزدوجات حرارية من النوع K	± 0.1 °C	-100 to 1370°C	0.0577
مقياس سرعة الرياح	0.1m/s	0.3-3m/s	0.0577

0.0577	0-2000g	0.1g	ميزان الكتروني
--------	---------	------	----------------

يظهر الشكل 3-5 التوزيع التخطيطي لمواقع هذه الحساسات الحرارية في كل من المقطر التقليدي (TSS) والمقطر المحسن (ISS)، ما يسمح بمراقبة الفروقات الحرارية بدقة وتفسير تأثير التصميم على الأداء الفعلي للنظام.

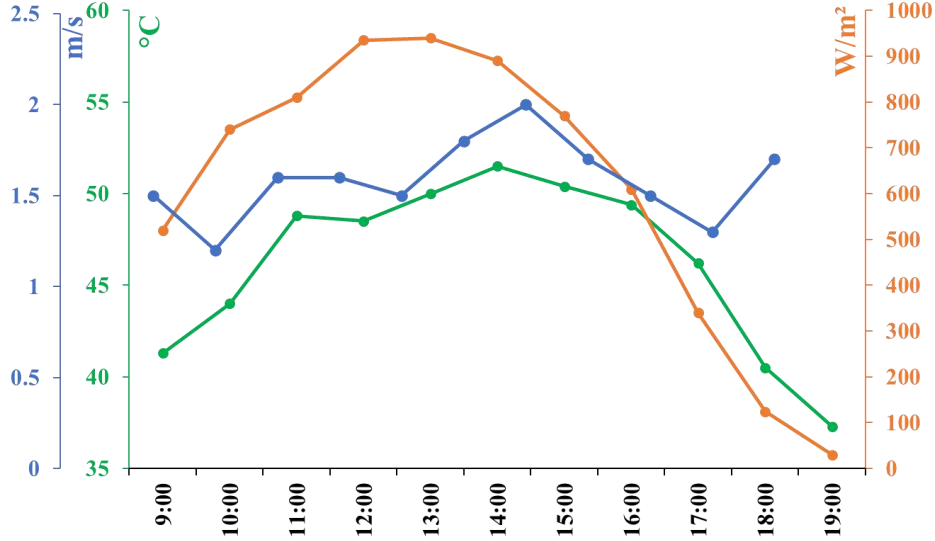


الشكل 3-5: توزيع المزدوجات الحرارية في كلا المقطرين

### 3-3-3 النتائج والمناقشات

تم إجراء التجربة الميدانية بتاريخ 5 يوليو 2023، واستمرت لمدة 11 ساعة متواصلة، بدءًا من الساعة 09:00 صباحًا وحتى الساعة 19:00 مساءً. خلال هذا الإطار الزمني، تم تسجيل بيانات دقيقة بفواصل زمنية منتظمة (كل ساعة) تتعلق بشدة الإشعاع الشمسي، كمية المياه المقطرة، درجات الحرارة في نقاط متعددة داخل كل من النموذجين: الوحدة الشمسية التقليدية (TSS) والوحدة المحسنة (ISS).

تميز يوم التجربة بظروف مناخية مناسبة للاختبار، حيث ساد طقس مشمس مستقر دون وجود سحب، ما أتاح الحصول على نتائج دقيقة تحت تأثير إشعاع شمسي مباشر. كما تميزت الأجواء بدرجات حرارة محيطية مرتفعة نسبياً، وهو أمر شائع في منطقة ورقلة خلال فصل الصيف.



الشكل 3-6: تغيرات شدة الإشعاع الشمسي، درجة حرارة الجو و سرعة الرياح

يوضح الشكل 3-6 التغيرات الزمنية في ثلاث متغيرات بيئية أساسية، شدة الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة المحيطية و سرعة الرياح. يظهر الشكل ارتفاع تدريجي خلال ساعات الصباح، وبلغت ذروتها عند الساعة 13:00 بقيمة قصوى تقارب  $940 \text{ W/m}^2$ ، ثم بدأت بالتناقص تدريجياً حتى وصلت إلى أدنى قيمة لها عند 30  $\text{W/m}^2$  مع اقتراب الغروب. بالنسبة لدرجات الحرارة تزايدت هي الأخرى تدريجياً منذ الصباح، حتى بلغت ذروتها عند الساعة 14:00 بقيمة تقارب  $51.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ، ثم بدأت بالانخفاض مع تراجع الإشعاع الشمسي. إضافة لذلك ظلت سرعة الرياح عموماً منخفضة خلال اليوم، مع تسجيل هبات خفيفة ومتفاوتة، مما ساعد في الحفاظ على استقرار حرارة النظام وعدم حصول فقد حراري مفرط.

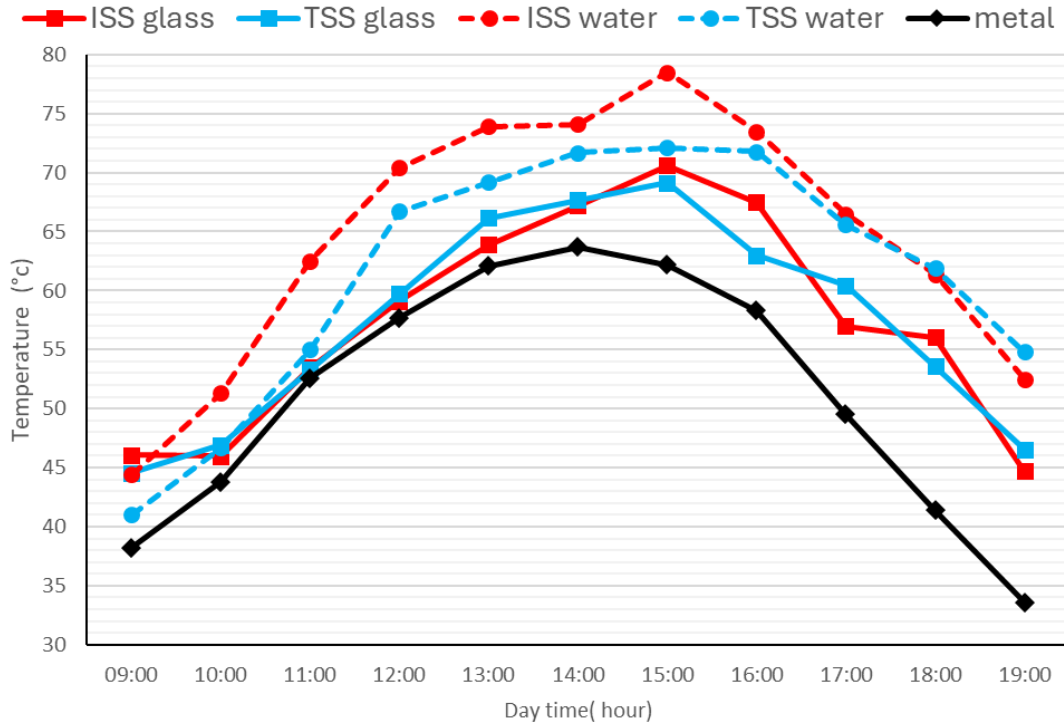
### 1-3-3-3 تغيرات درجات حرارة النظام

يُعد الإشعاع الشمسي العامل الأساسي الذي يُحدد ديناميكية التغير الحراري داخل المقطر الشمسي، حيث يؤثر مباشرة على درجة حرارة الماء المالح ودرجة حرارة السطح الزجاجي في كل من الوحدة الشمسية التقليدية (TSS) والوحدة المحسنة (ISS). يوضح الشكل 3-7 التغيرات الزمنية لدرجات الحرارة المسجلة خلال التجربة، درجة حرارة الماء، الغطاء الزجاجي الداخلي و الصفيحة المعدنية وذلك بالمقارنة مع تغيرات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطية على مدار اليوم.

تشير البيانات إلى أن كلا الوحدتين شهدتا ارتفاعًا تدريجيًا ملحوظًا في درجات الحرارة بين الساعة 09:00 صباحًا و15:00 مساءً، وهي الفترة التي تزامنت مع تزايد شدة الإشعاع الشمسي. خلال هذه المرحلة، زاد امتصاص الطاقة الشمسية من قبل الماء والزجاج، مما أدى إلى ارتفاع حرارتهما.

بلغت ذروة درجات الحرارة عند الساعة 15:00، حيث وصلت درجة حرارة الماء المالح في المقطر التقليدي (TSS) إلى  $72.1^{\circ}\text{C}$ ، في حين سجلت الوحدة المحسنة (ISS) درجة حرارة أعلى بلغت  $78.7^{\circ}\text{C}$ ، نتيجة مساهمة اللوح المعدني في تسريع التسخين وتحسين نقل الحرارة.

تؤكد هذه النتائج أن التعديل التصميمي المتمثل في إضافة اللوح المعدني في النظام المحسن قد ساهم في زيادة كفاءة امتصاص الطاقة الشمسية ورفع درجة حرارة المياه بشكل أسرع وأكثر فعالية مقارنة بالنموذج التقليدي، ما يُتوقع أن ينعكس على معدل التبخر والإنتاجية.



الشكل 3-7: تغيرات درجات حرارة الماء والزجاج والصفحة المعدنية للمقطر الشمسي التقليدي والمحسن

يُعزى ارتفاع درجة حرارة الماء المالح في الوحدة المحسنة (ISS) إلى التعديل التصميمي الفعال المتمثل في إضافة لوح معدني امتصاصي داخل النظام. يعمل هذا اللوح على امتصاص كمية إضافية من الطاقة الشمسية، والتي تُنقل بعد ذلك إلى الماء عن طريق آلية التوصيل الحراري، مما يوفر مصدرًا حراريًا ثانويًا يعزز من كفاءة التسخين مقارنة بالوحدة التقليدية (TSS) التي تعتمد فقط على الإشعاع المباشر. ورغم هذا الفرق الواضح في سلوك تسخين الماء بين النظامين، تُظهر درجة حرارة الزجاج العلوي في كلا النموذجين نمطًا حراريًا

متقاربًا، ما يُشير إلى أن خصائص الزجاج وتعرضه لنفس الظروف البيئية (إشعاع، تيارات هوائية) يُنتج سلوكًا حراريًا متماثلًا نسبيًا في آلية امتصاص وإشعاع الحرارة.

يوضح الشكل 3-7 أن درجة حرارة اللوح المعدني في الوحدة المحسنة تبدأ بالارتفاع التدريجي منذ ساعات الصباح، لتبلغ ذروتها عند حوالي الساعة 14:00، متزامنةً مع ذروة الإشعاع الشمسي. خلال هذه الفترة، يعمل اللوح كخزان حراري مؤقت، يمتص الحرارة بكفاءة ويُخزنها، ثم ينقلها مباشرة إلى الماء أسفلها، مما يُسهّم في تسريع وتسخين كتلة الماء في الحوض. مع انخفاض الإشعاع الشمسي بعد الساعة 14:00، تبدأ درجة حرارة اللوح المعدني بالانخفاض تدريجيًا بسبب فقدان الحرارة إلى البيئة المحيطة. وبحلول الساعة 18:00، يُلاحظ أن حرارة اللوح تنخفض إلى ما دون درجة الحرارة المحيطة، مما يؤدي إلى انعكاس في تدفق الحرارة، حيث يبدأ اللوح في سحب الحرارة من الماء بدلاً من تزويده بها، ما يُسرّع من عملية التبريد.

خلال الفترة ما بين 15:00 و18:00، تبدأ كلتا الوحدتين بفقدان الحرارة، إلا أن الفرق الحراري بين الماء في النموذجين يبقى ملحوظًا، حيث تظل الوحدة المحسنة (ISS) تحتفظ بدرجة حرارة أعلى، بفضل الازدواج في مصادر التسخين: الإشعاع المباشر والتوصيل من اللوح المعدني. أما الوحدة التقليدية (TSS)، فتعتمد فقط على الإشعاع المباشر، ولذلك تتراجع درجة حرارتها بسرعة أكبر مع انخفاض الإشعاع.

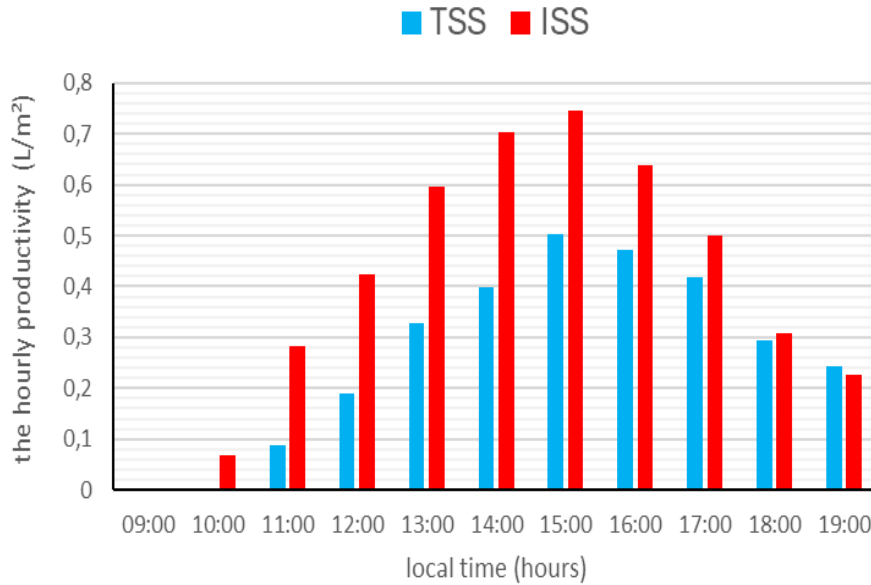
من الجدير بالذكر أنه بعد الساعة 18:00، تُسجّل ظاهرة انعكاسية حيث تنخفض درجة حرارة الماء المالح في الوحدة المحسنة إلى ما دون نظيرتها في الوحدة التقليدية. ويُعزى هذا إلى أن اللوح المعدني، بعد فقدانه حرارته، يتحول إلى مصدر سحب للحرارة من الماء نفسه، ما يُسرّع عملية التبريد داخل النظام المحسّن، ويُظهر العلاقة الديناميكية المعقدة بين خصائص المواد وآليات انتقال الحرارة في الأنظمة الحرارية.

### 2-3-3-3 إنتاجية المقطر الشمسي

تُعد إنتاجية الماء المقطر من المؤشرات الأساسية في تقييم أداء المقطر الشمسي وكفاءته الحرارية. ويوضح الشكل 3-8 مقارنةً زمنية للإنتاجية الساعية لكل من المقطر الشمسي التقليدي (TSS) والمقطر المحسن (ISS) المزود بلوح معدني امتصاصي، خلال يوم التجربة.

تشير النتائج إلى تفوق واضح للنظام المحسن (ISS)، حيث بدأ في إنتاج الماء المقطر عند الساعة 10:00 صباحًا، أي قبل ساعة كاملة من النظام التقليدي (TSS) الذي بدأ الإنتاج عند 11:00 صباحًا. ويُعزى هذا التباين في بدء عملية التقطير إلى الكفاءة الحرارية العالية للوحدة المحسنة، إذ تسمح اللوحة المعدنية برفع درجة حرارة الماء بسرعة بفضل امتصاصها العالي للإشعاع الشمسي ونقلها الفعال للحرارة.

بين الساعة 10:00 صباحًا و3:00 مساءً، ومع ازدياد شدة الإشعاع الشمسي، ارتفعت الإنتاجية في كلا النموذجين، إلا أن نظام ISS حافظ على تفوقه، محققًا كميات أكبر من المياه المقطرة خلال كل ساعة. يُعزى هذا الأداء إلى الكفاءة العالية في التوصيل الحراري التي توفرها اللوحة المعدنية، مما يعزز من فعالية عملية التبخر.

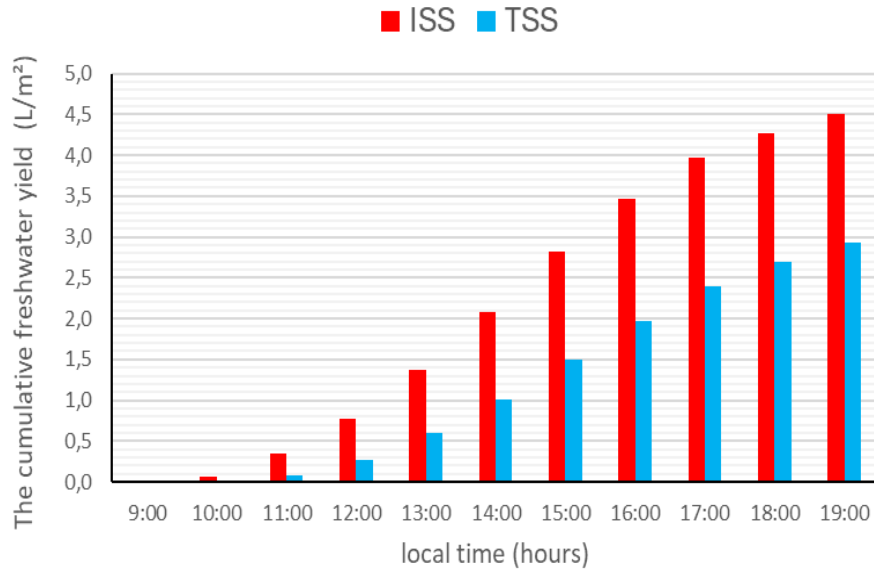


الشكل 3-8: تغيرات الانتاجية الساعية

بلغت ذروة الإنتاجية عند الساعة 15:00، حيث سجل المظطر المحسن إنتاجية قدرها 0.746 L/m<sup>2</sup>، مقارنة بـ 0.502 L/m<sup>2</sup> في النظام التقليدي، ما يمثل زيادة بنسبة تقارب 48.6% في تلك الساعة. يعود هذا التفوق إلى قدرة النظام المحسن على الاستفادة القصوى من ذروة الإشعاع الشمسي، إذ تحفز اللوحة المعدنية ارتفاع حرارة الماء وزيادة معدل التبخر.

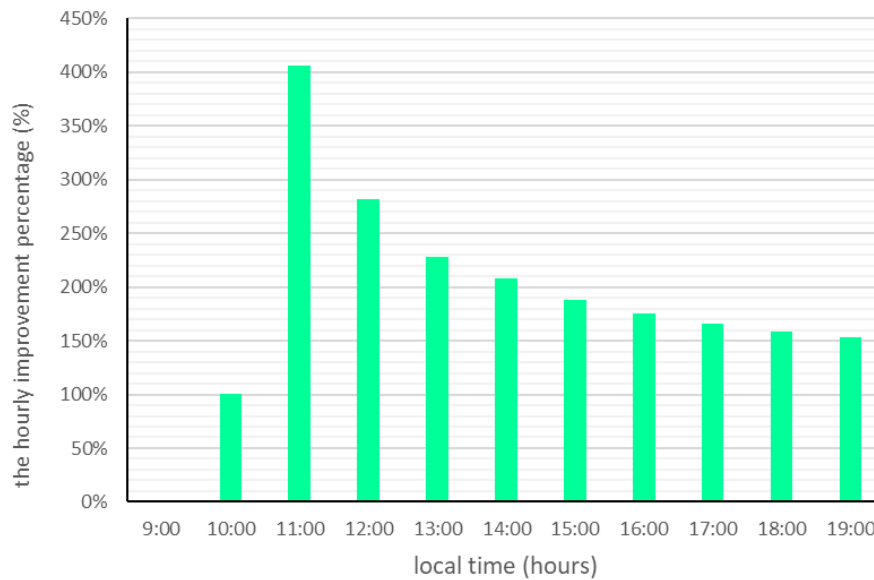
بعد الساعة 15:00، بدأت الإنتاجية في الانخفاض في كلا النظامين نتيجة انخفاض الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة. ومع ذلك، استمر نظام ISS في التفوق حتى الساعة 18:00، حيث انقلب الاتجاه، وتفوق TSS في الساعة الأخيرة (19:00). يُعزى هذا التحول إلى أن اللوحة المعدنية في نظام ISS، التي كانت مصدرًا حراريًا خلال النهار، أصبحت مصدر فقد حراري بعد انخفاض الإشعاع الشمسي، إذ لم تعد قادرة على تخزين الحرارة أو الحفاظ عليها، ما أدى إلى تسريع برودة النظام. تبرز هذه النتيجة أهمية دمج مواد لتخزين الطاقة الحرارية أو استخدام عزل حراري محسن في التصاميم المستقبلية، بهدف الحفاظ على الأداء المرتفع خلال فترات الإشعاع المنخفض أو بعد الغروب.

أما بالنسبة للإنتاجية التراكمية، فَيُبين الشكل 3-9 الفارق الكبير بين النظامين على مدار اليوم، حيث بلغت الإنتاجية الإجمالية لنظام ISS نحو  $4.5 \text{ L/m}^2$  ، مقارنة بـ  $2.9 \text{ L/m}^2$  فقط للنظام التقليدي. تمثل هذه الزيادة تحسناً كلياً بنسبة 55.17%، ما يدل بوضوح على الأثر الإيجابي للمهندسة الحرارية المحسنة على الأداء العام.



الشكل 3-9: تغيرات الإنتاجية التراكمية بدلالة الزمن

يُوضح الشكل 3-10 نسبة التحسن التراكمي الساعي لإنتاجية ISS مقارنة بـ TSS ، وتُظهر البيانات زيادة ملحوظة خلال ساعات الذروة، مما يؤكد فعالية التصميم المحسن في رفع الكفاءة التشغيلية خلال الفترات الحرجة.



الشكل 3-10: نسبة التحسن التراكمي الساعي

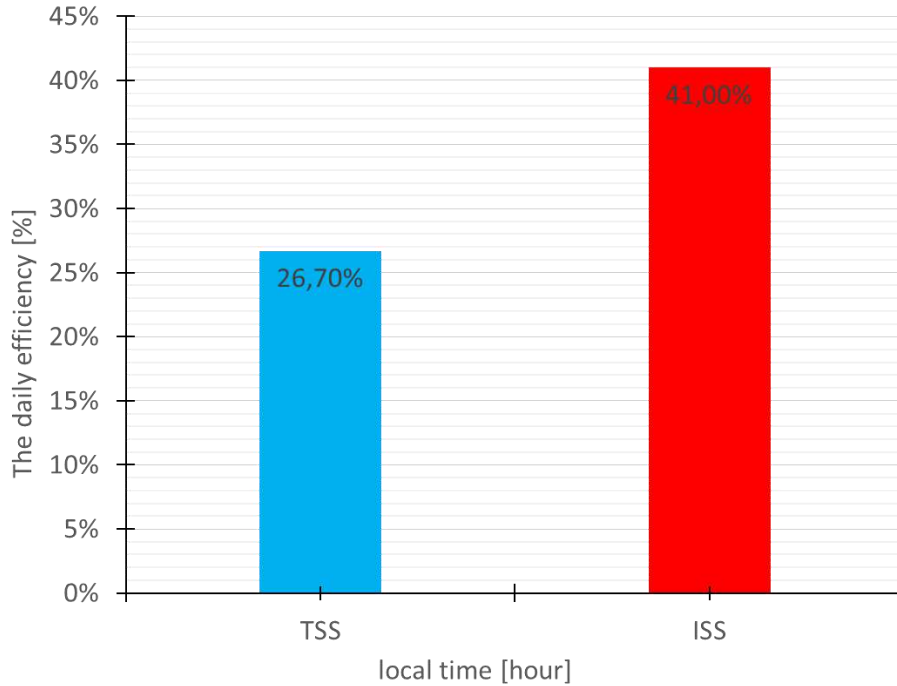
### 3-3-3-3 كفاءة المقطر الشمسي

تُعد الكفاءة الحرارية اليومية من أهم المؤشرات المستخدمة لتقييم فعالية أداء المقطر الشمسي اين يتم حسابها باستخدام معادلة 2-2، يوضح الشكل 3-11 نتائج الكفاءة اليومية لكلا النظامين، المقطر المحسّن (ISS) والمقطر التقليدي (TSS). وقد أظهرت البيانات فرقاً واضحاً في الكفاءة حيث حقق نظام ISS كفاءة يومية قدرها 41%، في حين سجّل نظام TSS كفاءة أقل بلغت 26.7% فقط.

يُعزى هذا الفارق الكبير في الكفاءة إلى عدة عوامل تصميمية وحرارية في النظام المحسن، أبرزها إدماج اللوحة المعدنية داخل المقطر، والتي أدت إلى تحسين كبير في سلوك امتصاص الطاقة.

تتميز اللوحة المعدنية بخصائص توصيل حراري عالية، ما يسمح لها بامتصاص كمية كبيرة من الإشعاع الشمسي خلال النهار، ثم نقلها بكفاءة إلى الماء داخل الحوض. هذا يُسرّع من عملية التسخين، ويُزيد من

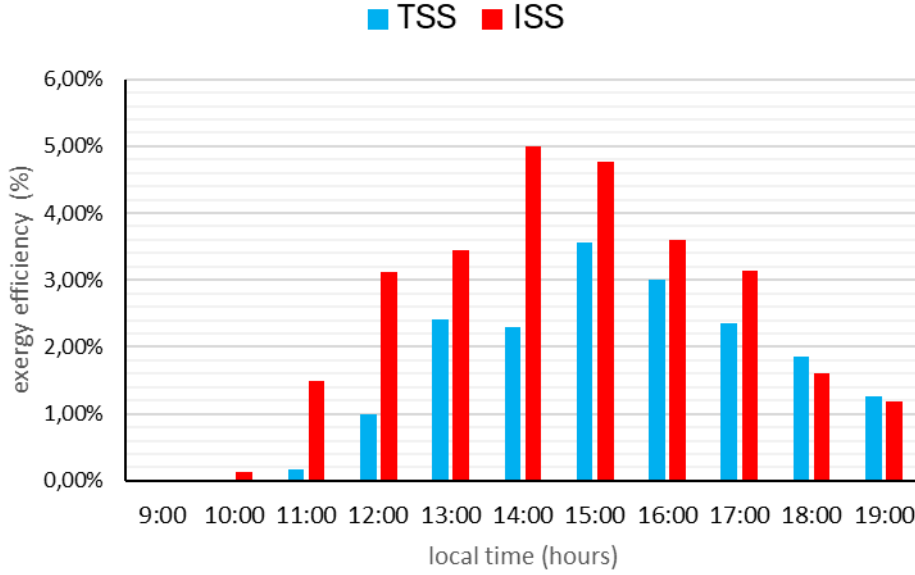
درجة حرارة الماء، مما يؤدي إلى تسريع التبخر وزيادة كمية الماء المقطر المنتج خلال اليوم. وبالتالي، تؤدي هذه الآلية المحسّنة لنقل الحرارة إلى رفع الكفاءة الكلية للنظام. تؤكد هذه النتائج أن التعديلات الهندسية البسيطة نسبياً يمكن أن تُحدث تأثيراً جوهرياً في الأداء الحراري للمقطر الشمسي، مما يُعزز من قابليته للتطبيق في المناطق ذات الإشعاع المرتفع والموارد المحدودة.



الشكل 3-11: مخطط الكفاءة اليومية

### 4-3-3-3 تحليل الإكسيري

يُعد تحليل الإكسيري من المؤشرات الحرارية الدقيقة لتقييم الكفاءة الحقيقية للنظام، إذ يأخذ بعين الاعتبار القدرة الفعلية للطاقة على أداء شغل مفيد، وليس فقط كمية الطاقة الحرارية الداخلة والخارجة اين يحسب بالمعادلة 2-5. يوضح الشكل 3-12 التغيرات الزمنية في كفاءة الإكسيري (Exergy Efficiency) لكل من المقطر الشمسي المحسن (ISS) والمقطر التقليدي (TSS).



الشكل 3-12: تغيرات exergy efficiency بلالة الزمن

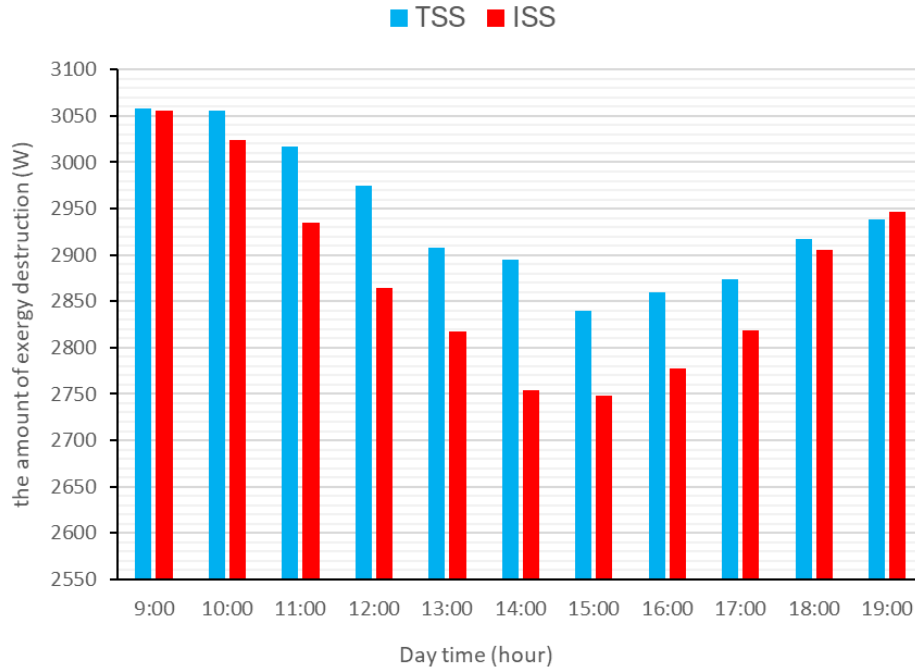
تشير البيانات إلى أن كفاءة الإكسيري في كلا النظامين ترتفع تدريجيًا خلال ساعات الصباح الأولى، ويُعزى هذا التحسن إلى تزايد شدة الإشعاع الشمسي، مما يُعزز من الفروق الحرارية داخل المقطر ويدفع بعملية التبخر إلى مستويات أكثر فعالية. يُظهر نظام ISS تفوقًا واضحًا في كفاءة الإكسيري مقارنة بـ TSS طوال غالبية ساعات التشغيل. ويُعزى هذا إلى وجود المجمع الشمسي المعدني الذي يُعزز امتصاص الإشعاع، ويُحسن آلية نقل الحرارة إلى الماء، مما يُرفع درجة الحرارة الداخلية ويزيد من فعالية استخدام الطاقة المتاحة.

بلغت ذروة كفاءة الإكسيري في نظام ISS نحو 5% عند الساعة 14:00، في حين سجّل النظام التقليدي TSS ذروته عند الساعة 15:00 بكفاءة بلغت 3.6%.

تُعزى الذروة المبكرة في النظام المحسن إلى قدرته الفائقة على امتصاص الإشعاع الشمسي واستخدامه بكفاءة خلال ذروة الظروف الحرارية، ما يؤدي إلى تسريع التبخر وتحقيق استفادة أعلى من الطاقة الشمسية.

بعد بلوغ الذروة، تبدأ كفاءة النظامين بالتراجع، إلا أن ISS حافظ على مستويات أعلى نسبيًا مقارنة بـ TSS حتى الساعة 18:00، ويرتبط هذا بقدرته على إدارة الحرارة وتخزينها مؤقتًا ضمن مكوناته المعدنية. لكن بعد الساعة 18:00، يحدث انعكاس في الكفاءة، حيث تبدأ كفاءة TSS بتجاوز نظيرتها في ISS. ويُعود هذا التراجع في أداء النظام

المحسن إلى أن المكونات المعدنية للمجمع، ذات التوصيل الحراري العالي، تفقد حرارتها بسرعة عند انخفاض الإشعاع ودرجات الحرارة المحيطة، ما يقلل الفرق الحراري اللازم لنقل الحرارة إلى الماء ويُضعف فعالية التبخر. في المقابل، يُظهر النظام التقليدي أداءً أكثر استقرارًا في الظروف الباردة لعدم احتوائه على مكونات حرارية إضافية قد تسحب الحرارة من النظام في حال انعكاس فرق الحرارة.



الشكل 3-13: تغيرات Exergy Destruction بدلالة الزمن

أما الشكل 3-13 فيوضح مقدار Exergy Destruction في كلا النظامين، والذي يُمثل الفاقد غير القابل للاسترداد من الطاقة بسبب اللاتوازنات الحرارية. يُظهر الشكل أن النظام المحسن ISS يُقلل من Exergy Destruction خلال ساعات الذروة، ما يؤكد كفاءته الأعلى في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة مفيدة.

### 5-3-3-3 الدراسة الاقتصادية

تم حساب تكلفة إنتاج اللتر الواحد من الماء المقطر (Cost Per Liter - CPL) لكل من المقطر الشمسي المحسن (ISS) والمقطن الشمسي التقليدي (TSS)، اعتمادًا على شروط تشغيل تماثل الواقع المناخي في مدينة ورقلة، الجزائر، وذلك على أساس دورة تشغيل سنوية تمتد لـ 365 يومًا. تم تقديم المعطيات المالية والتكلفة الأولية لكلا النظامين في الجدول 3-2

تُظهر نتائج تحليل الجدول أن النظام المحسن (ISS) يتطلب تكلفة ابتدائية أعلى مقارنة بالنظام التقليدي (TSS)، ويُعزى ذلك بشكل أساسي إلى دمج صفيحة معدنية تعمل مجمع شمسي إضافي. بلغت التكاليف التقديرية ل (TSS) 128,74 دولار و (ISS) 217,35 دولار بفارق نسبي يقدر بـ 68,8%. ورغم هذا الفارق في التكلفة الأولية، يُظهر ISS أداءً متفوقًا من حيث الإنتاجية الحرارية.

الجدول 2-3: مقارنة التكاليف الأولية لمكونات المقطرين الشمسيين التقليدي والمحسن

، بينما تم إجراء التحليل الاقتصادي المفصّل وفق المنهجية المبينة في القسم 2.6 ، وبناءً على معدل فائدة سنوي قدره 12% وعمر تشغيلي افتراضي يبلغ 10 سنوات (El Hadi Attia et al., 2023).

ISS			TSS				المكونات	
الثلث		الوحدة	القيمة	الثلث		الوحدة	القيمة	
الدولار	الدينار			الدولار	الدينار			
18,72	2496	م <sup>2</sup>	1,248	9,36	1248	م <sup>2</sup>	0,264	الغطاء الزجاجي
147,84	19712	م <sup>2</sup>	2,56	107,41	14322	م <sup>2</sup>	1,86	الصندوق الخشبي (خشب احمر) سمك 3سم
21,52	2870	م <sup>2</sup>	1,148	11,29	1505	م <sup>2</sup>	0,602	الحوض
11	1465	م <sup>2</sup>	0,586	0	0	-	-	الصفحة المعدنية
11,5	1536	م <sup>2</sup>	2,56	8,37	1116	م <sup>2</sup>	1,86	البوليستيرين
3,4	450	كغ	0,5	1,35	180	كغ	0,2	الطلاء الاسود
3,37	450	-	1,5	2,25	300	-	1	غراء السيليكون
217,35	28979			128,74	18671			التكلفة الاجمالية

تُظهر نتائج تحليل الجدول أن النظام المحسّن (ISS) يتطلب تكلفة ابتدائية أعلى مقارنة بالنظام التقليدي (TSS) ، ويُعزى ذلك بشكل أساسي إلى دمج صفحة معدنية تعمل مجمع شمسي إضافي. بلغت التكاليف التقديرية ل (TSS) 128,74 دولار و (ISS) 217,35 دولار بفارق نسبي يقدر بـ 68,8%. ورغم هذا الفارق في التكلفة الأولية، يُظهر ISS أداءً متفوقاً من حيث الإنتاجية الحرارية.

الجدول 3-2: مقارنة التكاليف الأولية لمكونات المقطرين الشمسيين التقليدي والمحسن

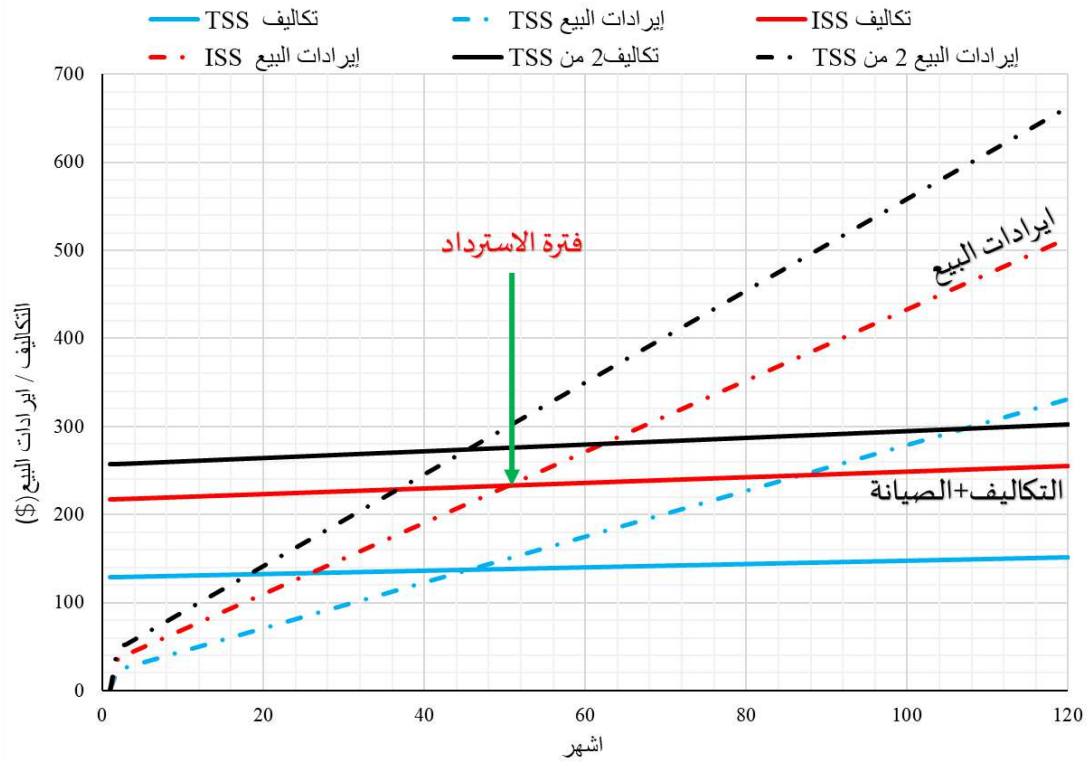
أن تكلفة إنتاج اللتر الواحد من الماء العذب بلغت 0,0242 دولار/لتر/م<sup>2</sup> للنظام المحسن و 0,0222 دولار/لتر/م<sup>2</sup> للنظام التقليدي حسب الجدول 3-3، ما يعادل فرق تكلفة قدره 9% فقط. يُظهر التحليل أن المقطر التقليدي أفضل اقتصاديًا رغم تفوق المقطر المحسن إنتاجيًا وان هذا الأخير غير مجدي اقتصادياً.

ISS			TSS			المكونات		
القيمة		الوحدة	القيمة	القيمة		الوحدة	القيمة	
الدولار	الدينار			الدولار	الدينار			
18,72	2496	م <sup>2</sup>	1,248	9,36	1248	م <sup>2</sup>	0,264	الغطاء الزجاجي
147,84	19712	م <sup>2</sup>	2,56	107,41	14322	م <sup>2</sup>	1,86	الصندوق الخشبي (خشب احمر) سمك 3سم
21,52	2870	م <sup>2</sup>	1,148	11,29	1505	م <sup>2</sup>	0,602	الحوض
11	1465	م <sup>2</sup>	0,586	0	0	-	-	الصفحة المعدنية
11,5	1536	م <sup>2</sup>	2,56	8,37	1116	م <sup>2</sup>	1,86	البوليستيرين
3,4	450	كغ	0,5	1,35	180	كغ	0,2	الطلاء الاسود
3,37	450	-	1,5	2,25	300	-	1	غراء السيليكون
217,35	28979			128,74	18671			التكلفة الاجمالية

الجدول 3-3: التحليل الاقتصادي لتكلفة إنتاج لتر واحد من الماء المقطر

n=10 years	i=12%	المعاملات	
ISS	TSS		
0,1769	0,1769		معامل رأس المال السنوي (CRF)
0,05698	0,0569		معامل صندوق الاستبدال (SFF)
38,4675	22,7849	(دولار)	التكلفة السنوية الثابتة (FAC)
43,47	25,748	(دولار)	قيمة الاستبدال (S)
2,4771	1,4672	(دولار)	القيمة المتبقية السنوية (ASV)
3,8467	2,2784	(دولار)	تكلفة الصيانة السنوية (AMC)
39,8371	23,5962	(دولار)	التكلفة السنوية الإجمالية (AC)
1642,5	1058,5	(لتر/م <sup>2</sup> /سنة)	الإنتاج السنوي من الماء (P <sub>n</sub> )
<b>0,0242</b>	<b>0,0222</b>	(دولار/لتر/م <sup>2</sup> )	تكلفة إنتاج اللتر الواحد (CPL)

ولاثبات ذلك أكثرنا قمنا برسم الشكل 3-14 الذي يمثل التكاليف الأولية و الأرباح لكل مقطر وتحديد فترة الاسترداد لمدة 10 سنوات وسعر البيع للتر الواحد من الماء المقطر 0,27 دولار اين تمثل نقطة تقاطع خط التكاليف وخط الأرباح لكل مقطر فترة الاسترداد الخاصة به.



الشكل 3-14: منحى التكاليف والأرباح لكل مقطر لمدة 10 سنوات

اين يُظهر أن أقصر فترة استرداد كانت للنموذج الأول، حيث قُدرت بـ 3,8 سنوات، مما يجعله خياراً أقل من حيث المخاطرة المالية مقارنةً بالمقطر المحسن الذي بلغت فترة استرداده حوالي 4,2 سنوات.

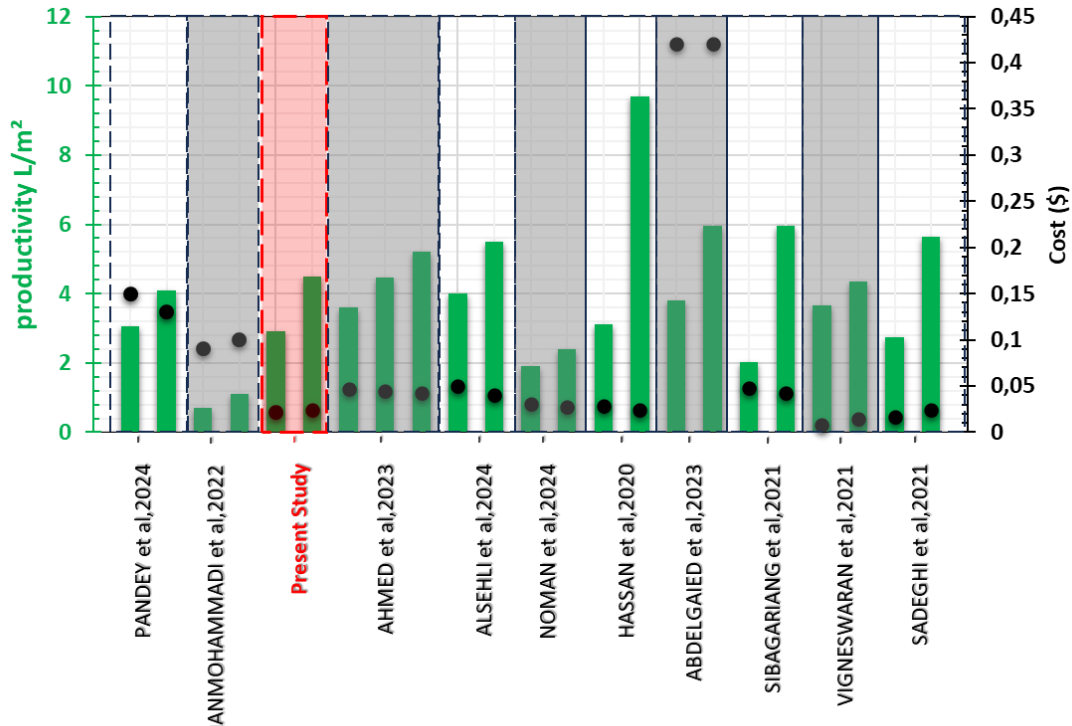
وعند مقارنة أداء وحدتين من المقطر التقليدي بوحدة واحدة من المقطر المحسن حسب الجدول 3-4، تبين أن فترة الاسترداد لوحديتين هي نفسها فترة استرداد وحدة واحدة من المقطر الاول، مع تفوق الوحدتين في الإنتاجية 5,8 لتر/يوم مقابل 4,5 لتر/يوم للمقطر الثاني.

الجدول 3-4: المقارنة الاقتصادية والإنتاجية بين وحدتين من المقطر التقليدي و وحدة من المقطر المحسن

المعيار	وحدتان من المقطر العادي	وحدة من المقطر المحسن	الميزة النسبية (%)
التكلفة (دولار)	257.48	217.35	تكلفة اعلى +19%
الإنتاجية (لتر/م <sup>2</sup> /يوم)	5,8	4,5	إنتاجية اعلى +28%

### 4-3-3 المقارنة مع الدراسات السابقة

يُوضّح الشكل 3-15 أداء نماذج المقطرات المختلفة من حيث إنتاجية المياه العذبة ، حيث تمثل النقاط السوداء البيانات الاقتصادية المرتبطة بكل تصميم.



الشكل 3-15: مقارنة إنتاجية المقطر الشمسي في الدراسة الحالية مع دراسات سابقة

تُظهر نتائج الدراسة الحالية المُشار إليها باللون الأحمر في الشكل مستوى إنتاجية تنافسيًا يفوق العديد من الدراسات السابقة المنشورة، مما يدل على فعالية التعديلات الهندسية المطبقة في النظام المحسّن. وقد تجاوز النموذج المقترح عدة تصاميم دولية من حيث كفاءة إنتاج المياه في نفس الظروف المناخية أو القربية منها.

عند مقارنة نتائج الدراسة الحالية مع الدراسات المرجعية، يتضح وجود تباين ملحوظ في العلاقة بين الإنتاجية والتكلفة. فقد أظهر (H. Hassan, 2020) إنتاجية أعلى للنظام المعدّل ( $MSS = 9.7 \text{ L/m}^2$ )، متفوقًا على الدراسة الحالية (Saada et al., 2025) بنسبة تقارب 115.6%. ومع ذلك، لم يُسجّل فرق يُذكر في التكلفة، حيث بلغت في كلتا الدراستين 0.024، مما يشير إلى أن التحسن الكبير في الإنتاجية في الدراسة لم يكن مصحوبًا بعبء اقتصادي إضافي. من جهة أخرى، سجل (Alsehli, 2024) إنتاجية أعلى ( $MSS = 5.5 \text{ L/m}^2$ )، متفوقًا على الدراسة الحالية بنسبة 22.2%، إلا أن التكلفة كانت أعلى بشكل ملحوظ (0.04)، بفارق نسبي بلغ حوالي 66.7%. مقارنة بتكلفة الدراسة الحالية، وهو ما يقلل من أفضلية هذا التفوق الإنتاجي من منظور اقتصادي. أما (Pandey & Naresh, 2024) فقد سجل إنتاجية أقل ( $MSS = 4.1 \text{ L/m}^2$ )، حيث تفوقت الدراسة الحالية بنسبة 9.8%، بينما كانت التكلفة أعلى بكثير (0.13)، أي بزيادة نسبية تقارب 441%، مما يعكس تفوقًا واضحًا للدراسة

الحالية من حيث الكفاءة الاقتصادية. وبالمقارنة مع (Khanmohammadi et al., 2022)، التي سجلت إنتاجية منخفضة ( $MSS = 1.1 \text{ L/m}^2$ )، تتفوق الدراسة الحالية بنسبة كبيرة بلغت 309%، رغم أن الفرق في التكلفة ظل محدودًا نسبيًا 76% فقط، مما يعزز من موثوقية التحسين المحقق في الأداء.

تشير هذه المقارنة إلى أن التقييم الواقعي لأداء المقطرات الشمسية لا ينبغي أن يعتمد على الإنتاجية فقط، بل على العلاقة التفاعلية بين الإنتاجية والتكلفة. وفي هذا السياق، يُظهر النظام المقترح في هذه الدراسة تكاملًا فعالًا بين تحسين الإنتاجية والتكلفة.

### 3-3-5 الخلاصة النهائية للتجربة

في هذه التجربة، تم تقييم أداء مقطرين شمسيين من النوع أحادي الميل: أحدهما تقليدي، والآخر معدل من خلال إضافة لوحة معدنية عاكسة موضوعة فوق الحوض المائي، بهدف تعزيز تركيز الإشعاع الشمسي وتحسين معدل التبخر. وقد أظهرت النتائج أن النموذج المحسن حقق إنتاجية يومية قدرها 4.5 لتر/م<sup>2</sup>، مقارنةً بـ 2.9 لتر/م<sup>2</sup> للنموذج التقليدي، أي بزيادة تُقدَّر بنحو 55.2%.

ورغم هذا التحسن في الأداء الحراري، كشف التحليل الاقتصادي عن ارتفاع كبير في التكلفة الأولية للنموذج المحسن بنسبة 69%، حيث بلغت 217.35 دولارًا، مقابل 128.74 دولارًا للنموذج التقليدي. وباحتساب تكلفة إنتاج اللتر الواحد وفق تحليل اقتصادي يأخذ بعين الاعتبار التكاليف الرأسمالية، والإنتاجية، والقيمة الزمنية للنقود (بمعدل فائدة 12%، وفترة تشغيل 10 سنوات)، تبين أن المقطر التقليدي يتفوق من الناحية الاقتصادية، إذ تبلغ تكلفة الوحدة المنتجة 0.0222 دولار/لتر، وهي أقل بنسبة 9% من تكلفة النموذج المحسن (0.0242 دولار/لتر).

بناءً على ما سبق، وعلى الرغم من التفوق الواضح للنموذج المحسن من حيث الأداء الإنتاجي، إلا أن ذلك لا يُترجم إلى جدوى اقتصادية ملموسة، إذ إن نسبة زيادة الإنتاجية (55%) تبقى أقل من نسبة الزيادة في التكلفة (69%)، كما أن فترة استرداد الاستثمار الإضافي أطول من المقطر الأول، وتُقدَّر بحوالي 4,41 سنوات مقارنة بـ 4,05 سنة للمقطر الأول. علاوة على ذلك حققت وحدتين من المقطر الأول نفس فترة الاسترداد لوحدة واحدة مع تفوق في الإنتاجية 5,8 لتر/يوم مقابل 4,5 لتر/يوم للمقطر الثاني، ما يجعل الاستثمار في النموذج التقليدي أكثر ترشيحًا من منظور اقتصادي طويل الأمد.

### 4-3 التجربة الثانية: تأثير الحرارة الجوفية على المقطر الشمسي

في إطار السعي المستمر لتحسين أداء المقطرات الشمسية ورفع كفاءتها الحرارية والإنتاجية، تم إجراء تجربة عملية ثانية تهدف إلى تقييم أثر نوعين مختلفين من التحسين على أداء المقطر الشمسي أحادي الميل في الظروف المناخية المحلية.

تستكشف الدراسة التجريبية تأثير نظام محاكاة الطاقة الحرارية الأرضية وتبريد الزجاج على أداء وحدات التقطير الشمسي تحت ثلاثة سيناريوهات مناخية مميزة: ظروف صافية ومستقرة، تذبذب متقطع في الإشعاع الشمسي والرياح، وتأثير رياح عالية مع تقلبات شمسية. أُجريت التجارب في أيام مختلفة لقياس التباين في الأداء تحت هذه الظروف، حيث مثلت اختبارات 30 أكتوبر 2024 السيناريو المتقطع (مع غطاء سحابي)، بينما مثل 31 أكتوبر يومًا صافيًا ومستقرًا. وبالمثل، شهد 6 يناير 2025 تأثير رياح عالية وتقلبات شمسية، بينما كان 7 يناير أكثر صفاءً. وقدّم 22 يناير 2025 (يوم صافٍ بالكامل) مرجعًا للظروف المستقرة، مع شمول القياسات للتشغيل الليلي (6:00 مساءً – 7:30 صباحًا) لتحليل الاحتفاظ الحراري.

تقيم الدراسة ثلاث تشكيلات TSS: (وحدة تقطير شمسي تقليدية) كخط أساس، و MSS-1 (وحدة تقطير شمسي معدلة 1) مزودة بمبادل حراري متصل بنظام محاكاة المياه الجوفية، و MSS-2 (وحدة تقطير شمسي معدلة 2) بتقنية تبريد خارجي للزجاج. يُقاس الأداء بناءً على الإنتاجية والكفاءة الطاقة (energy efficiency) والكفاءة الإكسيرجية (exergy efficiency) بالإضافة إلى التحليل الاقتصادي. من خلال اختبار هذه الوحدات تحت ظروف واقعية متنوعة، تقدم هذه البحث رؤى لتحسين تحلية المياه بالطاقة الشمسية بما يتجاوز سيناريوهات السماء الصافية المثالية.

وقد تم توظيف لوحة أردوينو (Arduino) كمنصة إلكترونية مفتوحة المصدر لقياس وتجميع البيانات الحرارية بدقة عالية، من خلال ربطها بمجموعة من الحساسات الحرارية وتخزين البيانات بشكل مستمر.

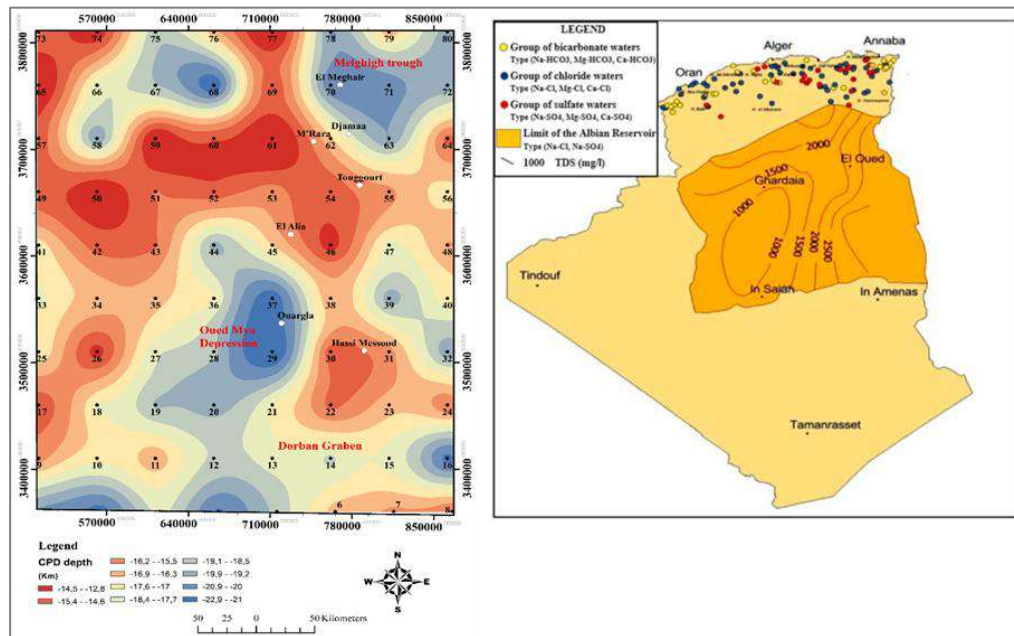
### 1-4-3 إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر

يضم شمال الجزائر العديد من الينابيع الحرارية المصنفة منخفضة إلى متوسطة الحرارة، موزعة من الشرق إلى الغرب وتمتد جنوباً، مع تركيز أعلى في المنطقة الشرقية. تم تحديث سجل الينابيع الحرارية ليشمل أكثر من 240 موقعاً، تتراوح درجة حرارة مياهها بين 22°م و 98°م. ومن أبرز هذه الينابيع: حمام بوحنيقية (68°م) بالمنطقة الغربية، وحمام البيبان (80°م) في المنطقة الوسطى، وحمام مسخوطين (98°م) في الشرق، والذي يشتهر كواحد من أشد الينابيع الحرارية حرارة في العالم (Fekraoui A, 2010; Saibi, 2009).

الجدول 3-5: الخصائص الهيدروكيميائية لعينات المياه الجوفية بمناطق مختلفة من الجنوب الجزائري (Ouali et al., 2018)

اسم البئر	الولاية	درجة الحرارة (م°)	الملوحة الكلية TDS (ملغ/لتر)	معدل التدفق (لتر/ثانية)	نوع المياه
H011-516	الوادي	65	1970	197	Na-SO <sub>4</sub>
J0010-583	ورقلة	51	1620	120	Ca-SO <sub>4</sub>
J0011-94	ورقلة	60	1760	150	Ca-SO <sub>4</sub>
L011-11	ورقلة	48	3333	22	Na-SO <sub>4</sub>
H008-59	الاغواط	34	2300	12	Ca-SO <sub>4</sub>
I009-55	غرداية	41	1569	160	Na-CL
G009-109	بسكرة	53	2822	100	Ca-CL

من جهة أخرى، يمتد الخزان الألبني – (Albien reservoir) الذي يُعد أحد أكبر الخزانات الجوفية المحصورة عالمياً – على مساحة مليون كم<sup>2</sup>، يقع 650,000 كم<sup>2</sup> منها جنوب الجزائر (بما فيها ولاية ورقلة التي تتميز بوجود خزانات جيولوجية عميقة)، و250,000 كم<sup>2</sup> في تونس، و100,000 كم<sup>2</sup> في ليبيا. ويُقدر احتواؤه على نحو 31,000 مليار متر مكعب من المياه.



الشكل 3-16: (يمين) تدرج الحرارة الأرضية لمنطقة الدراسة، (يسار) موقع وتركيب المواد الكيميائية للموارد

الحرارية الأرضية في المنطقة (Ouali et al., 2018)

تتكون الخزانات في جنوب الجزائر أساساً من الحجر الرملي، وتتراوح درجة حرارة مياهها السطحية بين 20°م و60°م. يقدم الجدول 3-5 البيانات الفيزيوكيميائية لعدة آبار محفورة، بينما يوضح Error! Reference source not found. (يميناً) مواقع الموارد الجيوحرارية الرئيسية وتركيبها الكيميائية في المنطقة (Ouali et al., 2018; Saibi, 2009). كما يقدم الجدول 3-6 الخصائص الحرارية لبعض الكتل في مناطق مختارة بولاية ورقلة، حيث يبين Error! Reference source not found. (يساراً) مواقع تلك المناطق (Melouah et al., 2021).

الجدول 3-6: الخصائص الحرارية والجيولوجية لبعض الآبار الجوفية المختارة في منطقة الدراسة

التدفق الحراري (ملي واط/م <sup>2</sup> )	التوصيلية الحرارية	التدرج الحراري (م/م <sup>°</sup> )	العمق حتى القاع (كم)	الإحداثيات (UTM)		الرقم التسلسلي
				الإحداثي الشمالي (م)	الإحداثي الشرقي (م)	
67.55	2.67	25.28	22.95	3,510,277.37	711,743.97	29
82.68	2.5	33.07	17.54	3,560,277.37	661,743.97	36
99.52	2.81	35.45	16.36	3,560,277.37	761,743.97	38

باستخدام نظام محاكاة الحرارة الجوفية يمكن تعزيز كفاءة أنظمة التقطير الشمسي لتسريع عمليات التبخر والتكثيف. يجسد هذا النهج التكامل بين تقنيات الطاقة المستدامة لتحقيق أداء أعلى. فدمج الطاقة الحرارية الأرضية، تزداد إنتاجية المياه العذبة من وحدات التقطير الشمسي، مع تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية، مما يعزز التوازن البيئي والاقتصادي ويدعم استدامة الموارد. في هذا السياق، قام (Verma et al., 2023) بدراسة أداء وحدة تقطير شمسي متكاملة مع مبادل حراري محوري في إيران، حيث أظهرت نتائجهم تحسناً ملحوظاً في الإنتاجية خلال فصل الشتاء. بينما حقق (Danish et al., 2019) في أداء وحدة تقطير شمسي مدمجة مع نظام تبريد جيولوجي ومضخة تفرغ، وطوروا نموذجاً تحليلياً تم حله باستخدام طريقة نيوتن-رافسون وقرنوا النتائج التي أظهرت تطابقاً كبيراً. ومن جهة أخرى، طور (Hammadi, 2020) نموذجاً مبسطاً لتحليل انتقال الحرارة والكتلة في وحدة تقطير شمسي متكاملة مع مبادل حراري أرضي (GHX)، حيث غطى النموذج آليات انتقال الحرارة والكتلة معاً. وأظهرت نتائجهم أن النظام المتكامل أنتج 7.48 كجم/م<sup>2</sup>·يوم من المياه العذبة، مقارنة بحوالي 5 كجم/م<sup>2</sup>·يوم في وحدات التقطير الشمسي التقليدية.

### 2-4-3 المنهجية

تتكون المنهجية من ثلاث مراحل رئيسية: جمع البيانات، إعداد النظام التجريبي وتحليل الأداء.

في المرحلة الأولى، تم جمع البيانات المناخية، بما في ذلك الإشعاع الشمسي، ودرجة حرارة الهواء المحيط، والرطوبة النسبية، وذلك من مصادر مثل Metronome و Weather Underground (WU)، بالإضافة إلى إجراء تقييمات للإمكانات الحرارية الجوفية.

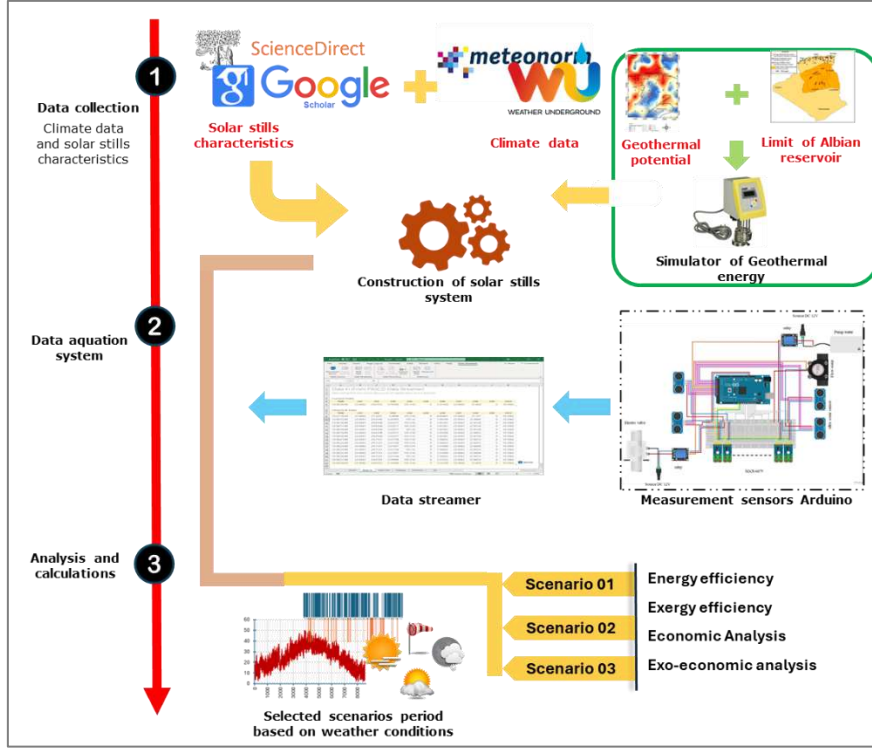
أما في المرحلة الثانية، فقد تم تطوير ثلاث تكوينات مختلفة للمقطر الشمسي:

TSS: لمقطر الشمسي التقليدي،

MSS-1: مقطر مدمج بالطاقة الجوفية،

MSS-2: مقطر مزود بنظام تبريد للزجاج.

وقد زُوِّدت هذه الأنظمة بمجموعة من الحساسات الإلكترونية لتمكين المراقبة المستمرة للأداء.



الشكل 3-17: المنهجية المتبعة في الدراسة

وفي المرحلة الأخيرة، تم إجراء اختبارات تجريبية تحت ظروف مناخية متغيرة شملت أيامًا مشمسة وغائمة، وذلك لتقييم الإنتاجية، وكفاءة الطاقة والإكسيري، إلى جانب الجدوى الاقتصادية. وقد تم تحليل النتائج لتقييم أثر كل من دمج الطاقة الجوفية وتبريد الزجاج على أداء النظام، كما هو موضح في الشكل 3-17.

### 3-4-3 نظرة عامة على النظام

صُمم هيكل وحدة التقطير الشمسي الأساسي من إطار خشبي بسُمك 2 سم وأبعاد إجمالية (57 سم × 47 سم × 15 سم). استُخدم غطاء زجاجي بسُمك 4 مم كسطح مكثف لحوض الوحدة. تتكون وحدة التقطير الشمسي من حوض مصنوع من الفولاذ المجلفن بسُمك 1.5 مم وأبعاد (54 سم × 44 سم × 3 سم). طُلي السطح الداخلي للحوض باللون الأسود لزيادة امتصاصه لأشعة الشمس. وللعزل الحراري، تم وضع صوف زجاجي بسُمك 10 مم على جميع الجوانب وقاعدة الوحدة. ولضمان إحكام إغلاق الوحدة ومنع تسرب البخار، تُبَت الغطاء الزجاجي بإحكام على الحافة العلوية للحوض باستخدام سيلكون مانع للتسرب. أُضيف قناة مائلة قليلاً لتكثيف الماء على طول الحافة السفلية للغطاء الزجاجي لجمع الماء المقطر.

النظام المعدل الأول (MSS-1): هو وحدة تقطير شمسي أساسية مُعززة بمبادل حراري تمر عبره المياه الساخنة الواردة من نظام محاكاة المياه الجوفية. يتكون المبادل الحراري من 18 أنبوبًا (طول كل 48 سم) تحتوي على 17 انحناءة (طول كل انحناءة 5 سم). يبلغ الطول الإجمالي للمبادل الحراري حوالي 950 سم، بقطر داخلي 3 مم وخارجي 5 مم. وتتوزع زعانف بشكل استراتيجي حول المبادل لزيادة مساحة سطح انتقال الحرارة وتعزيز التوصيل الحراري. تتدفق المياه الجوفية الساخنة طبيعيًا عبر المبادل، مُنقلة الحرارة إلى مياه الحوض مما يُسرّع عملية التبخر.

(تم توثيق خطوات تركيب وحدات التقطير الشمسية للأنظمة الثلاثة في الملحق الشكل 1A)



الشكل 18-3: الاعداد التجريبي

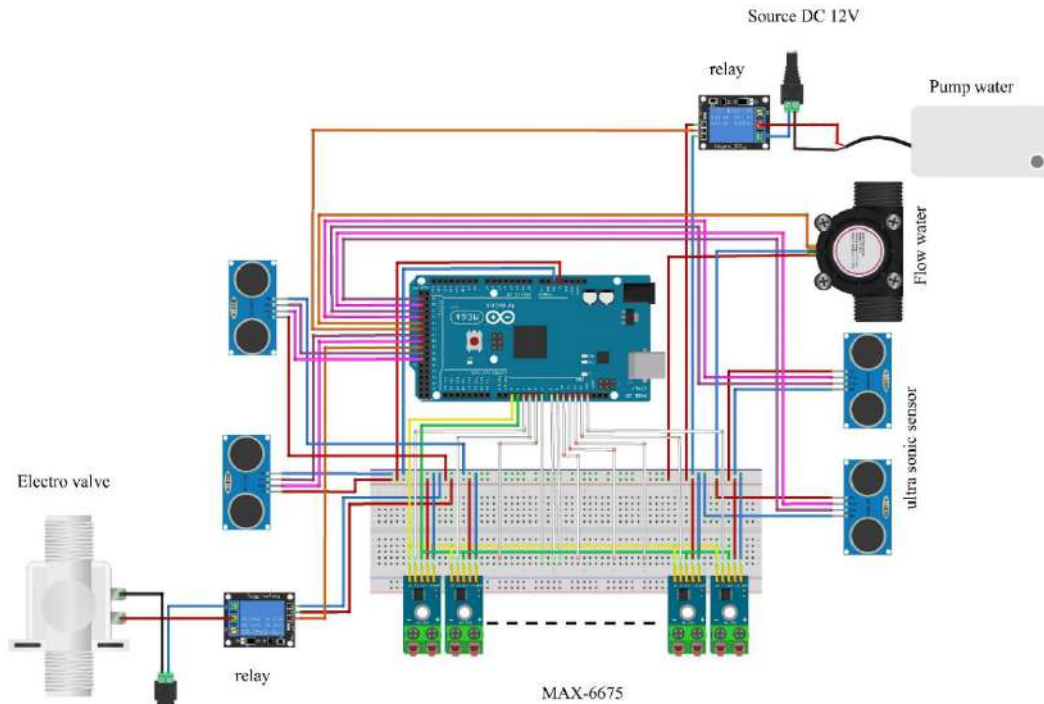
النظام الثاني المعدل (MSS-2): يتكون من وحدة تقطير شمسي مزودة بنظام تبريد للزجاج، حيث تم تركيب أنبوب به فتحات متقاربة وموزعة بانتظام على طول حافة الزجاج العلوية. يرتبط هذا الأنبوب بخزان

صغير في القاعدة يحتوي على مضخة صغيرة تدير الماء البارد داخل الأنبوب. (يُظهر الشكل 3-18 صورة تجريبية لإعداد النظام).

### 4-4-3 الاعداد التجريبي

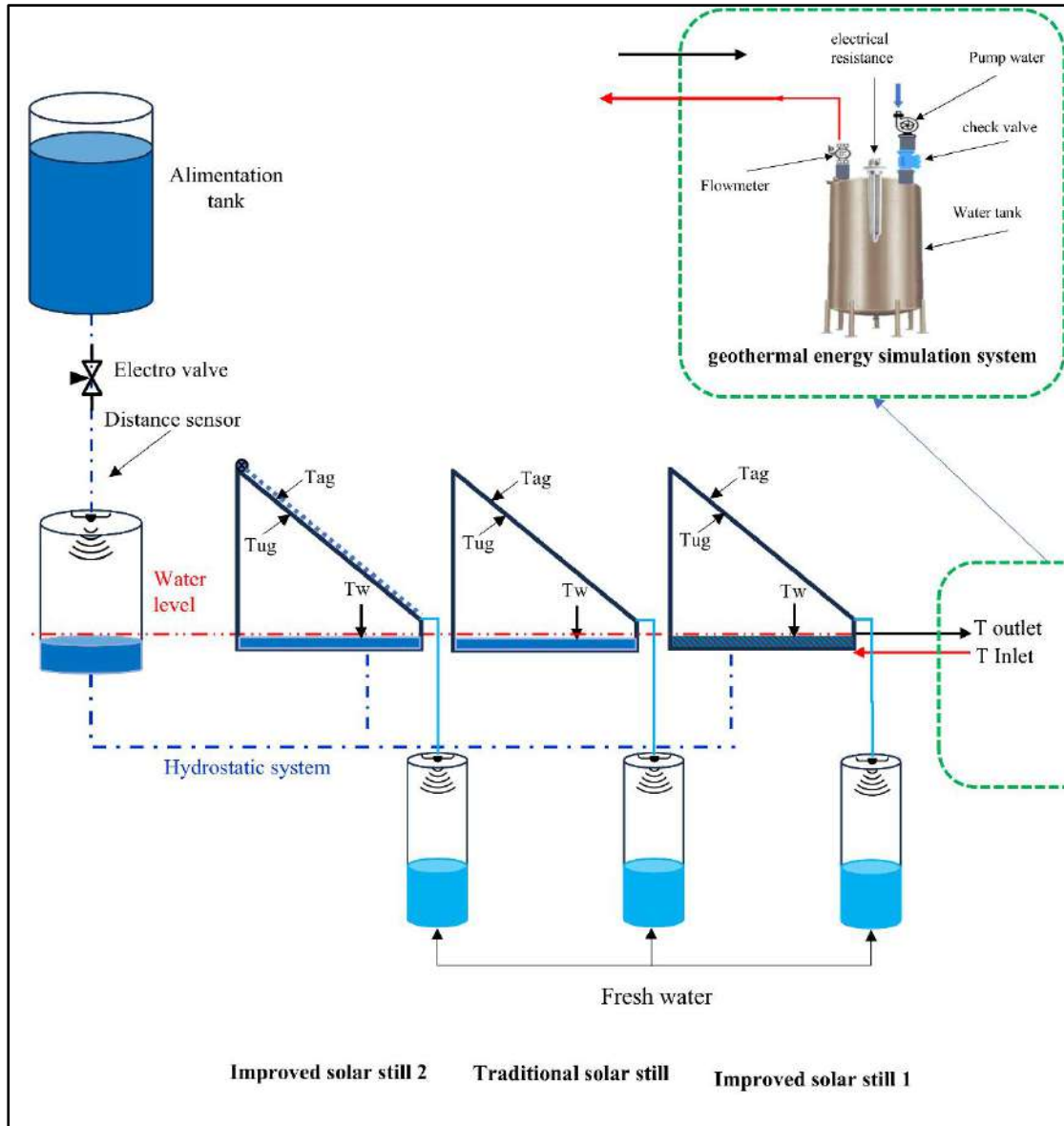
لضبط المتغيرات التصميمية والمناخية والتشغيلية، تم تركيب وحدات التقطير الشمسي التقليدية والمعدلة جنباً إلى جنب في نفس الموقع. في هذه الدراسة، أجريت جميع التجارب من الصباح حتى المساء، تسبقها مرحلة تمهيدية مدتها 12 ساعة لضمان تشغيل الأنظمة في ظروف مستقرة. أُخذت القياسات على مدى ثلاثة أيام مختلفة، يمثل كل منها حالة جوية مميزة.

يتم تدوير المياه الحرارية عبر مبادل حراري في (MSS-1)، حيث تراوحت درجة حرارة مدخلاتها بين 40°م و60°م. يسمح استخدام الطاقة الحرارية الأرضية للنظام بالحفاظ على درجات حرارة مياه أعلى وأكثر استقراراً، حتى في ظل الأشعاع الشمسي المنخفض (مثل الأيام الغائمة أو الليل). يُسرّع التسخين المستمر عملية التبخر ويعزز إنتاج الماء المقطر. أما (MSS-2) فيُفَعَّل نظام تبريد الزجاج تلقائياً عندما يتجاوز فرق الحرارة بين الماء المالح والسطح الداخلي للزجاج 7°م، وتتجاوز درجة حرارة الماء 50°م. عند هذه الشروط، تُشغَّل مضخة لتدوير مياه التبريد على سطح الزجاج. تتم هذه العملية بشكل آلي ويتم رصدها باستخدام نظام قائم على الأردوينو (Arduino) يوضح الشكل 3-19 المخطط التوصيلي لكافة أجهزة الاستشعار المتصلة بالأردوينو.



الشكل 3-19: مخطط ربط الحساسات بلوحة اوردوينو

استُخدم متحكم أردوينو لتسجيل قياسات دقيقة لمختلف المعلمات، بما في ذلك درجات الحرارة والإشعاع الشمسي. رُصدت تغيرات درجة الحرارة تحت الغطاء الزجاجي ( $T_{ug}$ )، وفوقه ( $T_{ag}$ )، وداخل الماء المالح ( $T_w$ ) لكلا المقطرين. بالإضافة إلى ذلك، قُيست درجات حرارة مدخل ومخرج المبادل الحراري ( $T_{inlet}$  و  $T_{outlet}$ ) في نظام MSS-1 باستخدام مُزدوجات حرارية من النوع K موضوعة في مواقع استراتيجية، كما هو موضح في الشكل 3-20.



الشكل 3-20: مخطط للنظام التجريبي

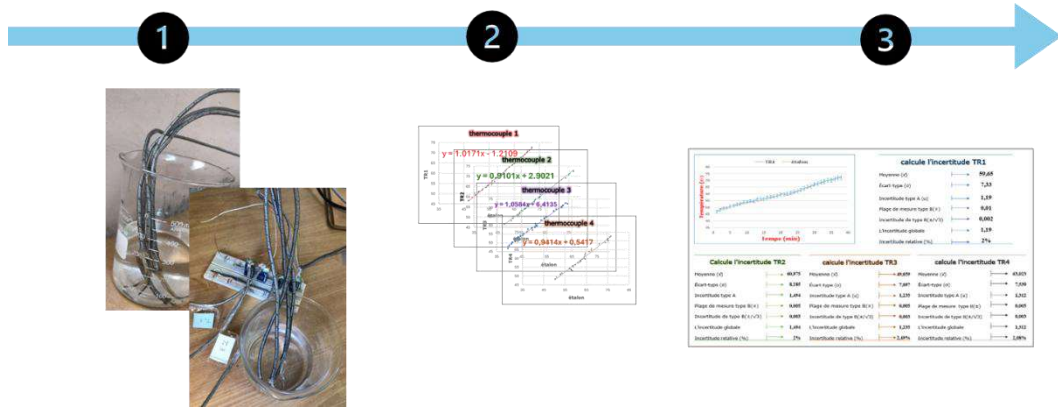
كما طُوّر نظام محاكاة للطاقة الحرارية الأرضية، يتضمن مضخة، ومقياس تدفق، وجهاز تنظيم التدفق، ومقاومة كهربائية لمحاكاة التسخين الحراري الأرضي. قُيس إنتاج الماء باستخدام خزانات أسطوانية مزودة بأجهزة استشعار للمسافة. تم التحكم في مستوى الماء في كل خزان عبر نظام آلي يتكون من خزان، وجهاز استشعار للمسافة، وصمام كهربائي.

### 5-4-3 معايرة المستشعرات

#### 1-5-4-3 معايرة مستشعرات الحرارة (max6675+type K)

الهدف من هذا العمل هو معايرة مستشعرات الحرارة ، والذي تعد الأداة الأساسية لقياس درجات الحرارة في هذه التجربة. ولتحقيق ذلك، قمنا بإجراء سلسلة من القياسات من خلال توصيل المزدوجات الحرارية من نوع K المرتبط بشريحة MAX6675 ببطاقة أردوينو. في الوقت ذاته، تم قياس نفس درجات الحرارة يدويًا باستخدام مقياس حراري رقمي يُعتمد عليه كمرجع دقيق الشكل 21-3. بعد جمع البيانات، قمنا بتمثيلها في شكل منحني يوضح العلاقة بين قراءات المزدوجات الحرارية وقراءات الجهاز المرجعي. ومن خلال هذا التمثيل، تم استخراج معادلة رياضية تقريبية تعبر عن هذه العلاقة. تمت برمجة هذه المعادلة داخل كود الأردوينو، بحيث تُصحح قراءات المزدوجات تلقائيًا أثناء التشغيل، وبهذا تم تنفيذ عملية المعايرة بنجاح.

#### 2-5-4-3 معايرة مستشعرات المسافة (ultra sonic)



الشكل 21-3: خطوات معايرة الترموكوبل

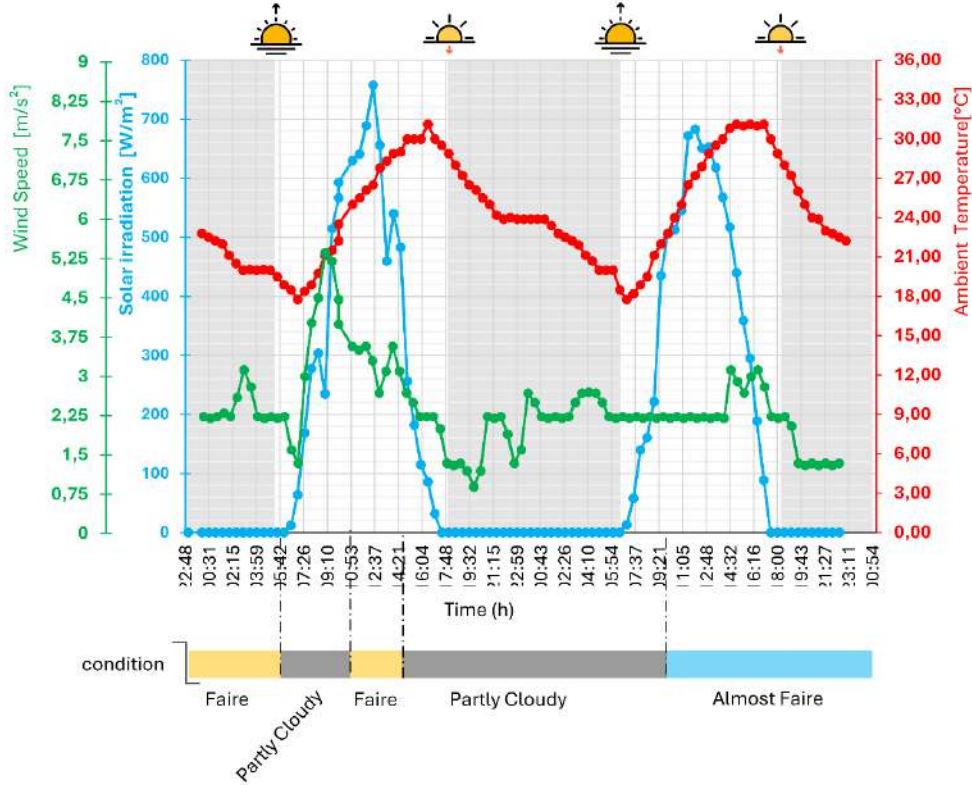
من أجل ضمان دقة القياسات المسجلة، تم إجراء عملية معايرة لمستشعرات المسافة فوق الصوتية (Ultrasonic Sensors) المستخدمة في النظام التجريبي. تعتمد هذه المستشعرات على مبدأ إرسال موجات صوتية عالية التردد واستقبالها بعد انعكاسها عن الجسم المستهدف، ليتم حساب المسافة بناءً على زمن الانتقال بين الإرسال والاستقبال. وقد أُجريت المعايرة بوضع جسم على مسافات معايرية محددة مسبقًا (10، 20، 30 سم، ...). وتسجيل القيم المقروءة من المستشعر ultra sonic عند كل مسافة. بعد ذلك تم تحليل النتائج لتحديد العلاقة الرياضية بين المسافة الحقيقية والمسافة المقاسة، واستخلاص معامل تصحيح (Calibration Factor) يتيح تعديل القراءات وتحسين دقة القياس. كما تمت عملية المعايرة في ظروف بيئية ماثلة لتلك التي تم فيها تنفيذ التجارب الأساسية، بهدف تقليل تأثير العوامل الخارجية مثل درجة الحرارة والرطوبة على سرعة انتشار الموجات فوق الصوتية ودقة النتائج النهائية.

### 6-4-3 تحليل النتائج

#### 1-6-4-3 سيناريو تأثير التذبذب المتقطع في الإشعاع الشمسي والرياح

قارنت الدراسة التجريبية في هذا السيناريو أداء وحدات التقطير الشمسي الثلاث (TSS، وMSS-1، وMSS-2) على مدار يومين متتاليين (30 و31 أكتوبر). يركز التحليل على اتجاهات الإنتاجية والكفاءة الطاقة والكفاءة الإكسبرجية تحت ظروف مناخية مختلفة.

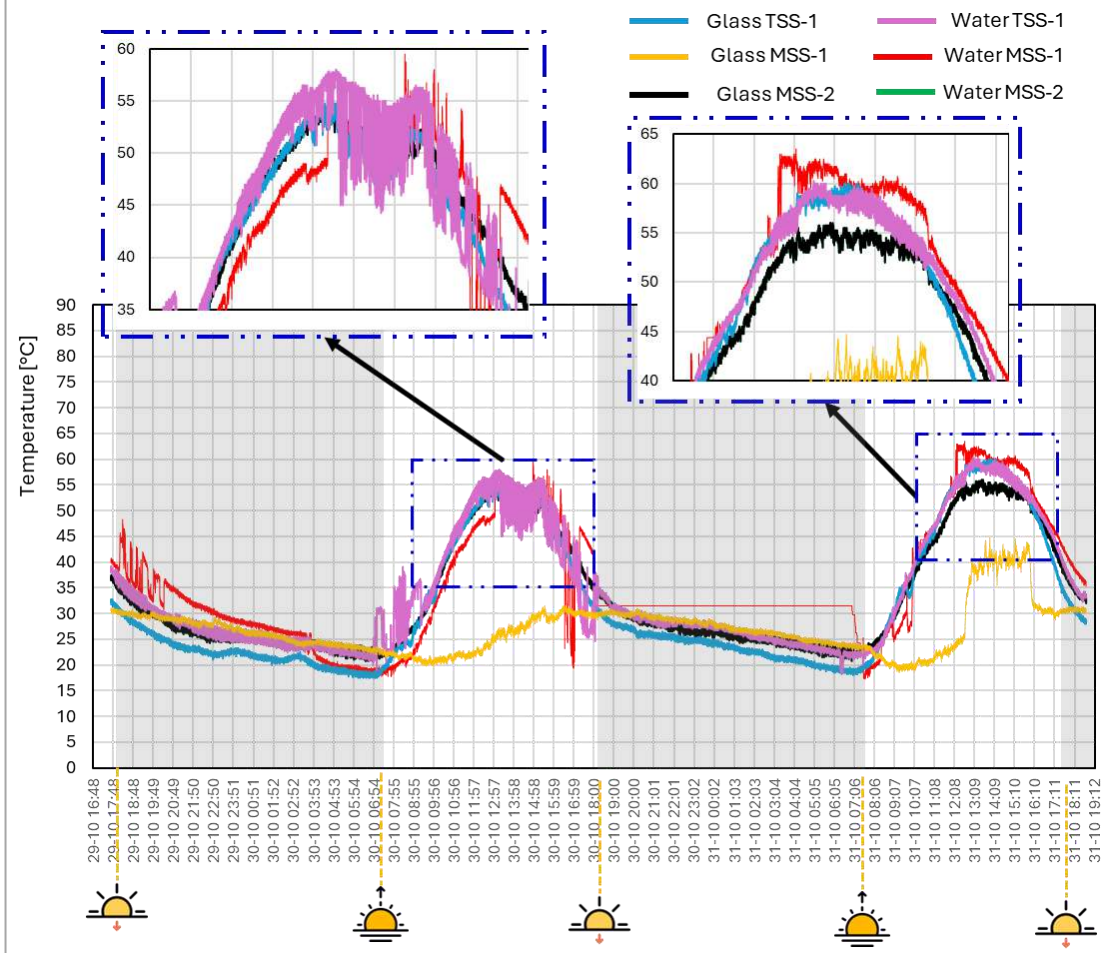
في 30 أكتوبر، سادت ظروف جوية صافية الشكل 3-22 مع زيادة تدريجية في الإشعاع الشمسي صباحًا وبلوغ ذروته  $780 \text{ w/m}^2$  ظهرًا ثم انحداره مساءً. ارتفعت درجة الحرارة المحيطة بثبات مما عزز ظروف تبخر ملائمة داخل الوحدات. تذبذبت سرعة الرياح طوال اليوم بدءًا من  $2.1 \text{ W/m}^2$ ، وصولاً إلى الحد الأقصى  $5.5 \text{ m/s}$  عند 09:30، ثم انخفضها إلى  $2.3 \text{ m/s}$  بحلول 16:30، مما قد يؤثر على الفقد الحراري.



الشكل 3-22: التغيرات الساعية في درجة حرارة المحيط والإشعاع الشمسي وسرعة الرياح خلال يومي 30 و31 أكتوبر 2024

أما في 31 أكتوبر، ف لوحظت ظروف مناخية مماثلة مع ارتفاع ثابت في شدة الشمس صباحًا وانخفاض بعد الظهر. سُجلت تباينات طفيفة في درجة الحرارة المحيطة وسرعة الرياح التي بقيت شبه ثابتة عند  $2.2 \text{ m/s}$ ، مما يشير إلى تأثير مستقر نسبيًا على أداء النظام.

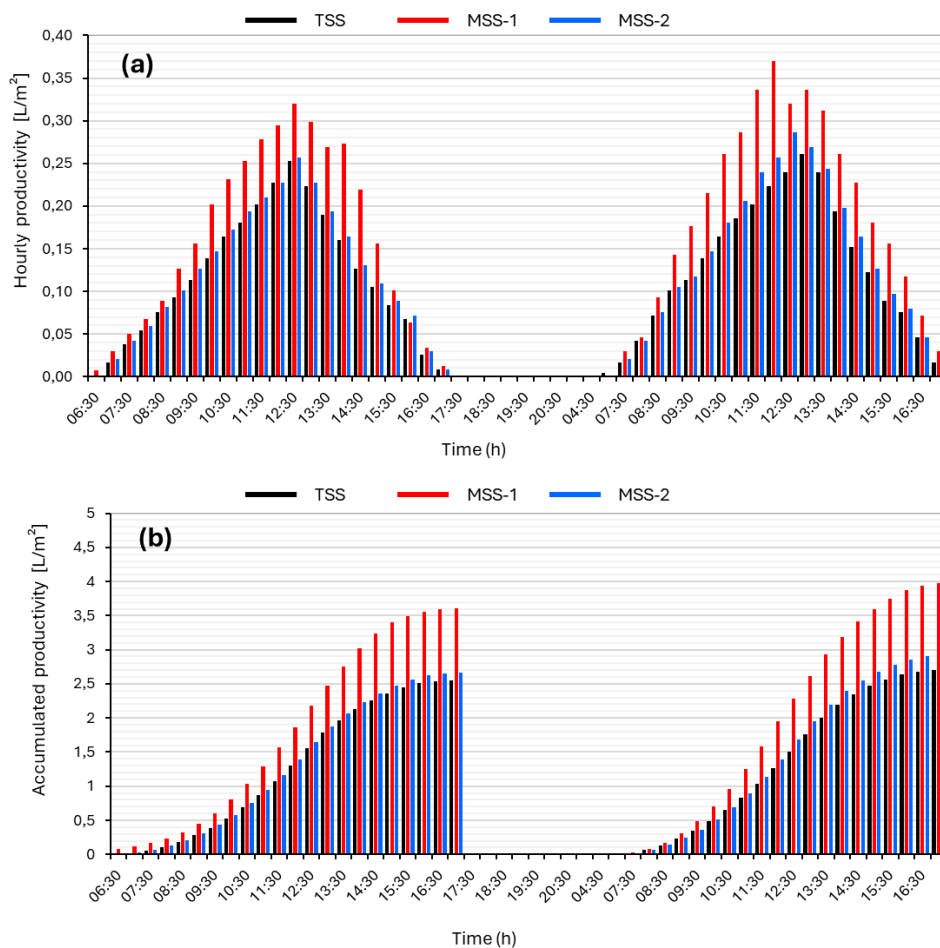
تلعب بيانات درجة الحرارة دورًا محوريًا في فهم الأداء الحراري للوحدات الثلاث TSS وMSS-1 وMSS-2. تشمل المتغيرات الحرارية الرئيسية التي تم تحليلها: درجة حرارة الزجاج (المؤثرة على معدل التكثيف)، ودرجة حرارة الماء (المؤثرة على معدل التبخر)، وتغيرات الحرارة خلال اليوم كما يوضح الشكل 3-23.



الشكل 3-23: التغيرات الساعية لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي و المياه المالحة للمقطرات الثلاثة ليومي 30 و31 اكتوبر 2024

يوضح الشكل 3-23 أنه في 30 أكتوبر اتبعت درجات حرارة الزجاج والماء دورة يومية متوقعة بلغت ذروتها ظهرًا، حيث سجلت MSS-1 أعلى درجة حرارة للماء ( $\sim 57^{\circ}\text{C}$ ) بسبب الدمج الجيوحراري بينما سجلت MSS-2 درجة حرارة تقارب ( $\sim 53^{\circ}\text{C}$ )، في حين سجلت TSS أدنى حرارة للماء ( $\sim 50^{\circ}\text{C}$ ) بسبب فقدان الحرارة. أظهرت اتجاهات درجة حرارة الزجاج الترتيب التالي MSS-2 > MSS-1 > TSS، حيث حافظت MSS-2 على أدنى درجات حرارة للزجاج بفضل آلية التنظيف التي عززت التبريد الحراري. وكان الفرق في درجات الحرارة ( $\Delta T$ ) الأعلى في MSS-1، مما أدى إلى معدلات تبخر وتكاثف أكبر، وبالتالي إنتاجية مياه عذبة أعلى.

في 31 أكتوبر، بقيت التغيرات الحرارية متشابهة، مع زيادة طفيفة في سرعة الرياح أثرت على الفواقد الحرارية. وبلغت درجة حرارة الماء الذروي مجددًا عند ( $64^{\circ}\text{C}$ ) لـ MSS-1، مؤكدةً الميزة الحرارية الناتجة عن دمج الطاقة الجوفية. أما MSS-2 فقد حافظ على كفاءة امتصاص شمسي أفضل من سجل ( $58^{\circ}\text{C}$ )، بينما استمر TSS في إظهار أقل كفاءة بسبب الفواقد الحرارية العالية تقدر ب ( $53^{\circ}\text{C}$ ). وقد ساهمت سرعة الرياح العالية في تبريد أسرع للزجاج، مما ساعد MSS-2 في الحفاظ على أدنى درجات حرارة للزجاج، وبالتالي تعزيز كفاءة التكاليف. ورغم الانخفاض الطفيف في درجات الحرارة القصوى مقارنة بـ 30 أكتوبر، ظل ترتيب الإنتاجية كما هو ( $\text{TSS} > \text{MSS-2} > \text{MSS-1}$ )، مما يؤكد على دور فرق درجات الحرارة وسرعة الرياح في أداء النظام.



الشكل 3-24: التغيرات الساعية واليومية للإنتاجية للماء المقطر للمقطرات الثلاثة خلال 30 و 31 أكتوبر 2024

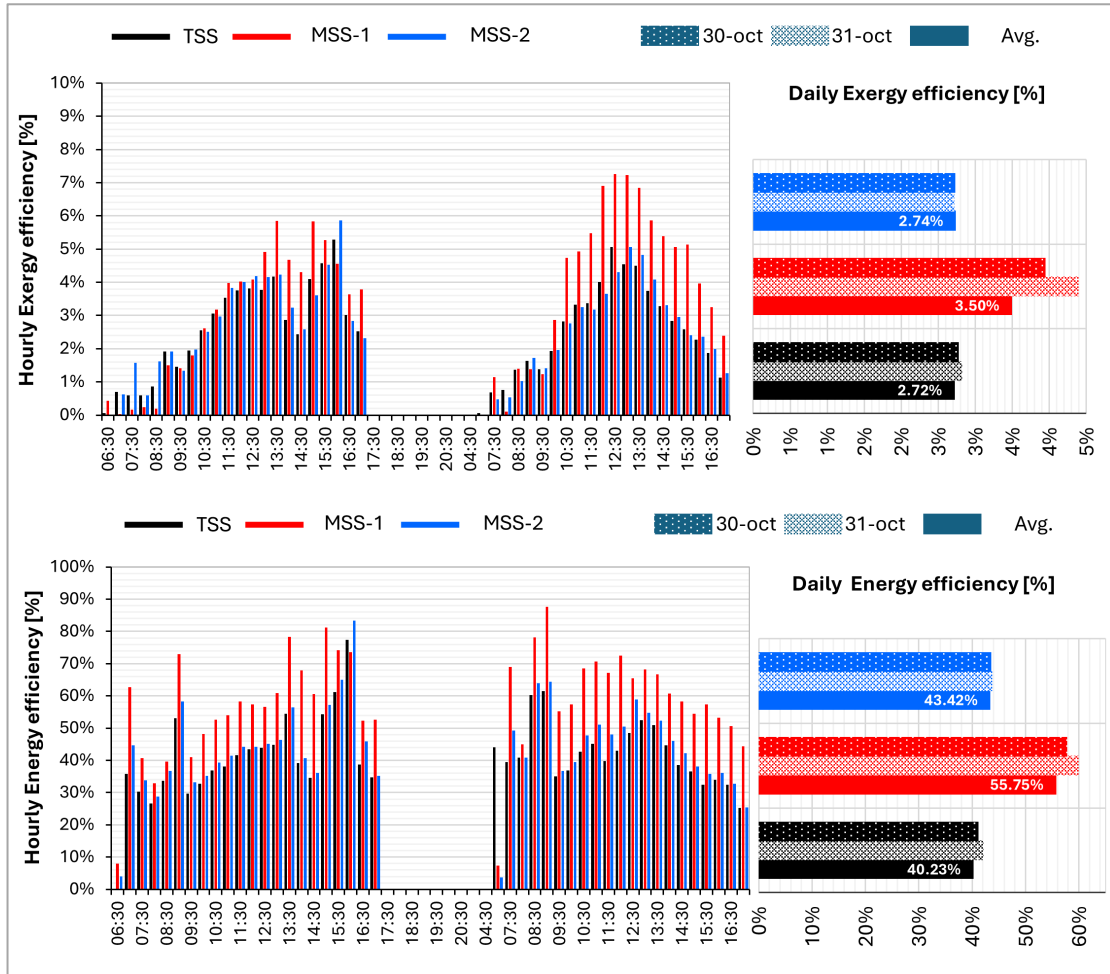
تُظهر بيانات الشكل 3-24 الإنتاجية ليومي 30 و 31 أكتوبر اختلافات واضحة في أداء أجهزة التقطير الشمسي. في 30 أكتوبر، بلغت الإنتاجية اليومية التراكمية لجهاز MSS-1 حوالي  $3.6 \text{ L/m}^2$ ، بينما سجل جهاز TSS/MSS-2 ما يقارب  $2.54 \text{ L/m}^2$ . وبلغت أعلى إنتاجية ساعية في الساعة 12:30، حيث بلغ إنتاج جهاز MSS-1 حوالي  $0.31 \text{ L/m}^2$ . وشهدت الفترة الصباحية (6:30-9:30) فرقاً ملحوظاً في معدلات الزيادة، حيث أظهرت MSS-1 زيادة بنسبة 39%، بينما وصلت إلى 65% في جهازي TSS/MSS-2. أما في منتصف النهار (9:30-1:30 ظهرًا) فقد

سجل النظامين 23%. ومع ذلك، في فترة ما بعد الظهر (13:30-15:30)، انخفضت تغيرات الإنتاجية بشكل كبير، وتراوحت بين 8% و9%. تلاها زيادة هامشية بنسبة 1.5% في الساعات الأخيرة (15:30-17:30).

في 31 أكتوبر، كان أداء MSS-1 أفضل، حيث تراكم  $3.96 \text{ L/m}^2$ ، بينما سجل MSS-2  $2.69 \text{ L/m}^2$ . وبلغت أعلى إنتاجية ساعية لـ MSS-1 في الساعة 12:30 بقيمة تقدر بـ  $0.37 \text{ L/m}^2$  متجاوزة ذروة اليوم السابق. بشكل عام، تشير البيانات إلى أن MSS-1 يتفوق باستمرار على TSS و MSS-2 من حيث الإنتاجية اليومية التراكمية. تشير المنحدرات الصباحية الأعلى في 31 أكتوبر إلى تحسن في الكفاءة الحرارية للنظام، ويعود ذلك على الأرجح إلى ظروف بيئية أكثر ملاءمة أو تحسين الاحتفاظ بالحرارة. يُبرز الفرق في ذروة الإنتاجية لكل ساعة بين اليومين تأثير التغيرات المناخية، مما يؤثر على دورة التبخر والتكثيف والأداء العام لوحدة التقطير الشمسي.

كشف التحليل اليومي/الساعي لكفاءة الطاقة والاستهلاك الحراري لوحدة التقطير الشمسي الثلاثة TSS و MSS-1 و MSS-2 (الموضحة في الشكل 25-3) عن اختلافات واضحة في الأداء. تقيس كفاءة الطاقة تحويل الطاقة الشمسية الممتصة إلى حرارة مفيدة للتبخير، بينما تُقيّم كفاءة الاستهلاك الحراري مدى فعالية استخدام الطاقة المتاحة في العمل الإنتاجي.

في 30 أكتوبر، ارتفعت الكفاءة الطاقوية تدريجيًا من الصباح حتى منتصف النهار، حيث بلغت ذروتها بين الساعة 12:30 و 14:00، ثم بدأت في الانخفاض خلال فترة بعد الظهر. سجل النظام MSS-1 أعلى كفاءة طاقوية (~55.75%)، مما يؤكد أن دمج الطاقة الجوفية يُحسن بشكل كبير من احتفاظ النظام بالحرارة ويعزز عملية التبخر. يليه النظام MSS-2 بكفاءة طاقوية تقارب (~43.42%)، محققًا تحسنًا ملحوظًا مقارنة بـ TSS، وذلك بفضل امتصاص شمسي أفضل نتيجة نظافة سطح الزجاج. أما TSS فقد سجل أدنى كفاءة (~40.23%)، ويعود ذلك على الأرجح إلى الفواقد الحرارية وانخفاض فرق درجات الحرارة بين الماء والزجاج. وقد تم تسجيل نفس الاتجاه تقريبًا في 31 أكتوبر، حيث حافظ MSS-1 على تفوقه في الكفاءة، يليه MSS-2 ثم TSS، مع وجود بعض التغيرات الطفيفة الناتجة عن تقلبات الأحوال الجوية. أما كفاءة الإكسيري، والتي تُعد عمومًا أقل من الكفاءة الطاقوية بسبب الفواقد الحرارية الكامنة، فقد بلغت ذروتها أيضًا قرب منتصف النهار في كلا اليومين. في 30 أكتوبر، حقق MSS-1 أعلى كفاءة إكسيري (~3.50%)، مما يجعله الأكثر فعالية في استغلال الطاقة المتاحة لعملية التبخر. في المقابل، سجل MSS-2 كفاءة إكسيري قدرها (~2.74%)، وهي أعلى قليلًا من تلك المسجلة في TSS (~2.72%)، مما يشير إلى تفوق طفيف يعود لتحسن الامتصاص الشمسي.



الشكل 25-3: تغيرات energy/exergy efficiency اليومية والساعية خلال 30 و 31 أكتوبر 2024 لكل المقطرات الثلاثة

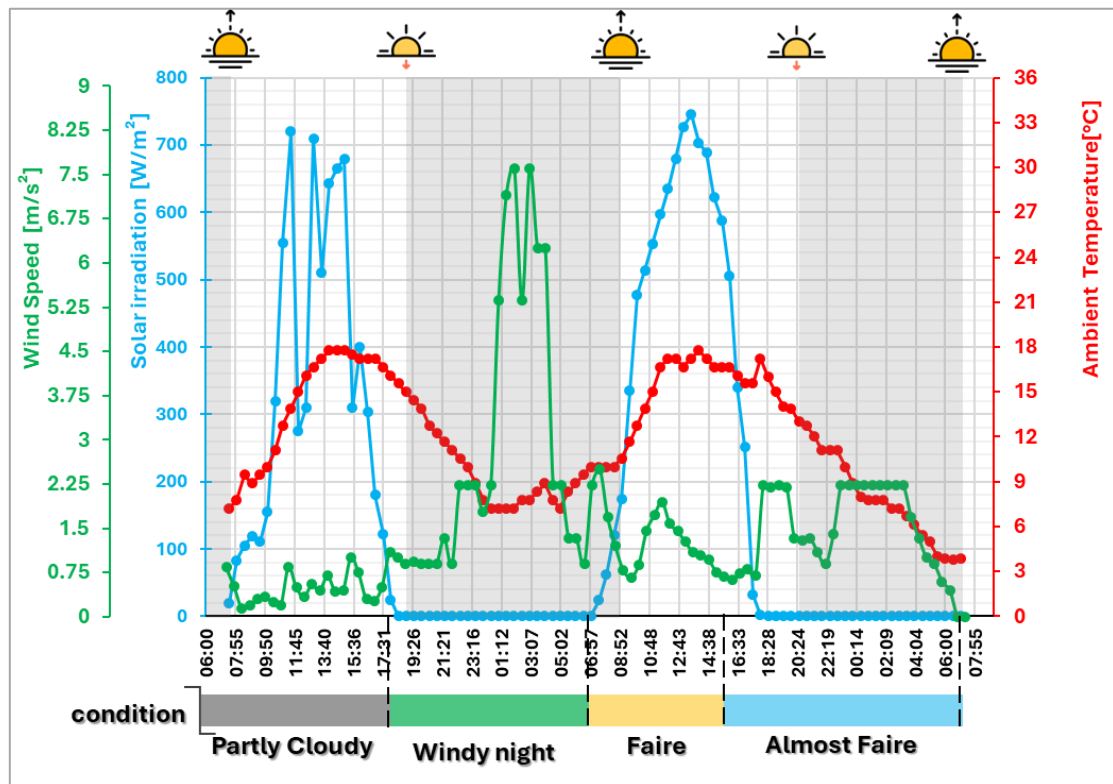
وقد بقي هذا الترتيب ثابتاً في 31 أكتوبر، مما يعزز تأكيد تفوق MSS-1 المستمر في استغلال الإكسيري مقارنة ببقية التصميمات. وبمقارنة الأداء العام للمقطرات الشمسية، تصدر MSS-1 الترتيب بكفاءة طاوقية بلغت 55.75% وكفاءة إكسيري 3.50%، مما يثبت أن دمج الطاقة الجوفية يُعزز الأداء الحراري وكفاءة استغلال الطاقة بشكل واضح. أما MSS-2 فقد حقق تحسناً متوسطاً، حيث بلغ 43.42% في الكفاءة الطاوقية و2.74% في كفاءة الإكسيري، ما يؤكد أن آلية تنظيف الزجاج تُحسن من الامتصاص الشمسي ولكن تأثيرها محدود على كفاءة الإكسيري. وظل TSS الأقل كفاءة بين النماذج الثلاثة، مسجلاً أدنى القيم في الكفاءة الطاوقية (~40.23%) والإكسيري (~2.72%)، مما يعكس محدوديته في تحويل الطاقة بفعالية.

### 2-6-4-3 تأثير الرياح الشديدة مع التقلبات الشمسية

يعرض الشكل 26-3 التغيرات في سرعة الرياح، الإشعاع الشمسي، ودرجة حرارة الهواء المحيط خلال يومين (6-7 يناير). في 6 يناير، لم يكن الإشعاع الشمسي مستقرًا طوال اليوم، حيث ظهرت تقلبات ملحوظة بدلاً من الارتفاع التدريجي المعتاد. ويعود هذا الاضطراب على الأرجح إلى وجود غيوم متقطعة أو اضطرابات جوية أثرت على كمية الطاقة الشمسية الواصلة إلى المقطرات. وقد بلغ الإشعاع الشمسي الأقصى ما بين 600 و700

W/m<sup>2</sup>، لكن لوحظت انخفاضات متكررة على مدار اليوم. تراوحت درجة حرارة الهواء بين 8°C كحد أدنى و 33°C كحد أقصى، وهو فرق حراري كبير قد يؤثر بشكل مباشر على معدلات التبخر. أما سرعة الرياح، فقد شهدت تقلبات بدورها، وبلغت ذروتها عند 7.5m/s، ما قد يكون قد ساهم في زيادة الفواقد الحرارية بالحمل، خاصةً عند سطح الزجاج.

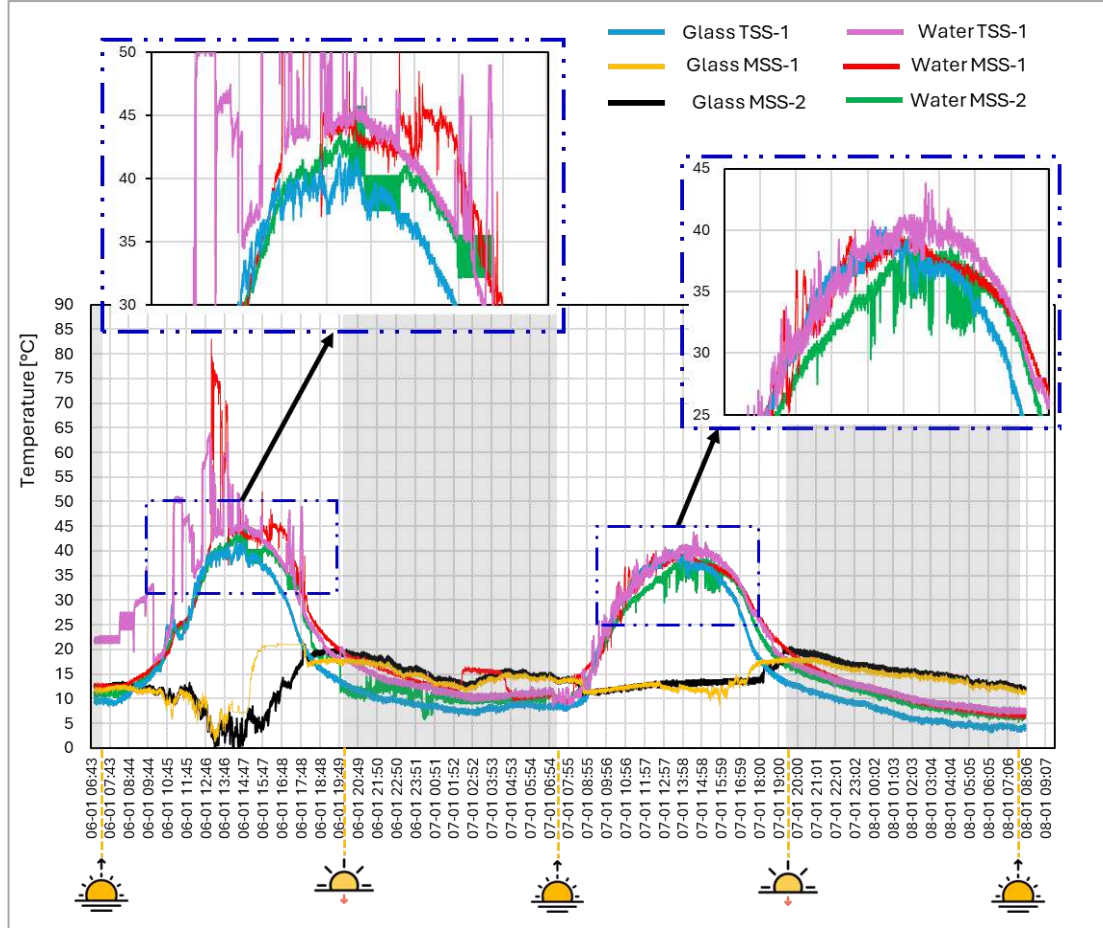
في 7 يناير، كان الإشعاع الشمسي أكثر استقرارًا مقارنةً باليوم السابق، حيث أظهر ارتفاعًا تدريجيًا في الصباح، بلغ ذروته عند منتصف النهار، ثم بدأ في الانخفاض مع حلول المساء. تبعت درجة حرارة الهواء نفس النمط، حيث تراوحت بين 9°C كحد أدنى و 32°C كحد أقصى. أما سرعة الرياح، فقد تميزت بتقلبات حادة، مع فترات من الارتفاع والانخفاض السريع، مما قد يكون له تأثير على ديناميكية انتقال الحرارة بالحمل داخل المقطرات الشمسية. ومن المحتمل أن هذه التقلبات، إلى جانب اختلاف درجات الحرارة، أثرت على الكفاءة الحرارية العامة وإنتاجية المقطرات.



الشكل 3-26: التغيرات الساعية في درجة حرارة المحيط والإشعاع الشمسي وسرعة الرياح خلال 6 و 7 يناير 2025

تكشف تحليلات درجات الحرارة ليومي 6 و 7 يناير كما هو موضح في الشكل 3-27 عن تأثير استقرار الأحوال الجوية على الأداء الحراري. في 6 يناير، أدى تغيرات الإشعاع الشمسي وارتفاع سرعة الرياح إلى انخفاضات متكررة في درجات حرارة الماء والزجاج الداخلي، حيث بلغ الحد الأقصى لدرجات الحرارة في MSS-1 حوالي 48°C للماء و 52°C للزجاج الداخلي، تلاه MSS-2 بدرجاتي 44°C و 49°C، ثم TSS بـ 41°C و 45°C على التوالي.

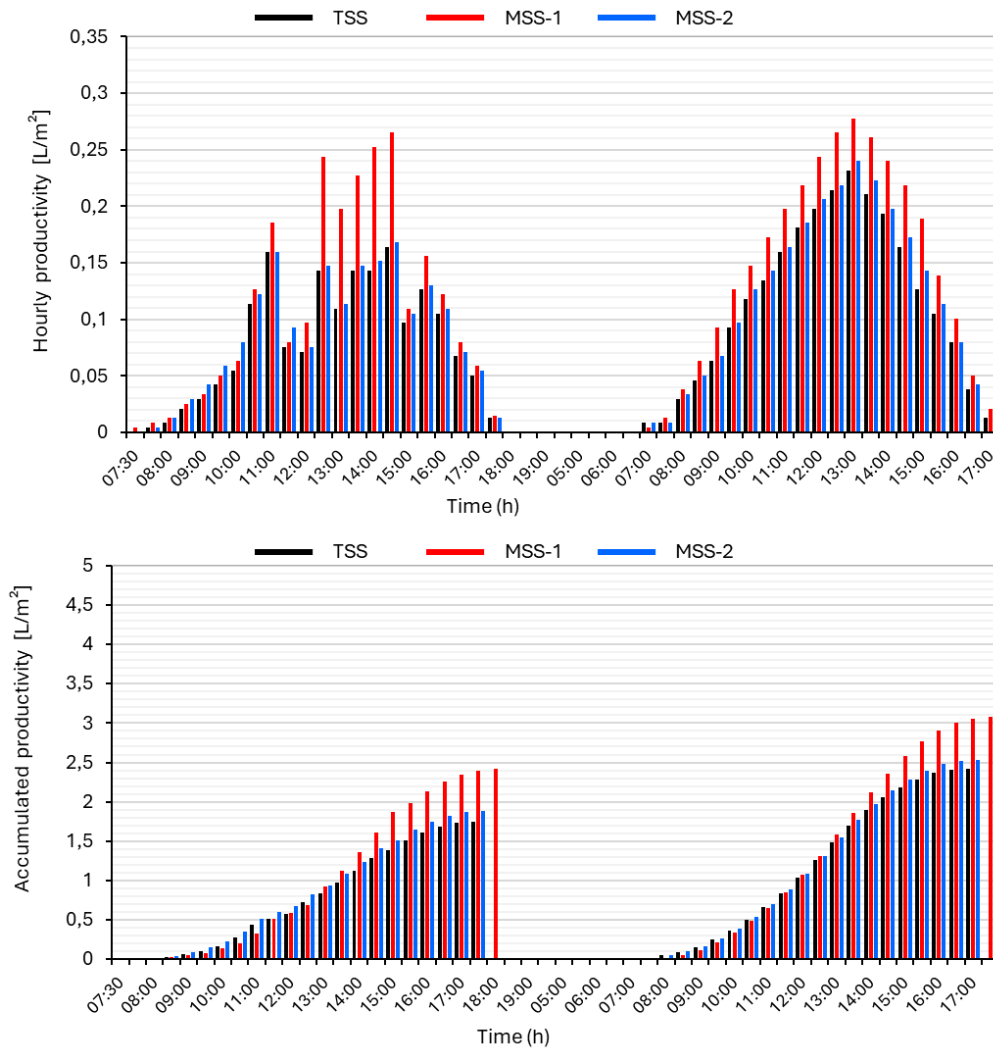
في المقابل، شهد يوم 7 يناير ظروفًا أكثر استقرارًا، مما سمح للنظام MSS-1 بالوصول إلى 54°C للماء و58°C للزجاج الداخلي، و MSS-2 إلى 50°C و55°C، بينما بلغ TSS 46 °C و 51°C للزجاج الداخلي والخارجي على التوالي. تؤكد هذه النتائج أن استقرار الطقس يُعزز احتفاظ الأنظمة الحرارية بالطاقة ويزيد من معدل التبخر، حيث واصل MSS-1 في تحقيق أعلى كفاءة بفضل دمج الطاقة الجوفية، بينما أظهر MSS-2 تحسنًا متوسطًا، وظل TSS الأقل كفاءة بين النماذج الثلاثة.



الشكل 3-27: التغيرات الساعية لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي والماء المالح لكل المقطرات على مدار 6 و 7 يناير 2025

تُظهر الرسوم البيانية للإنتاجية الشكل 3-28 كمية المياه المنتجة بالساعة من قبل المقطرات الشمسية الثلاثة خلال يومين متتاليين. يتضح من الشكل العام أن الإنتاجية تتبع بشكل وثيق تغيرات الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة، مع فروقات كبيرة بين اليومين بسبب تقلبات الأحوال الجوية. في 6 يناير، أدت الاضطرابات الجوية المتمثلة في سرعة الرياح العالية (بلغت ذروتها أكثر من 8 m/s) والتذبذب في الإشعاع الشمسي (بين 100 و700W/m<sup>2</sup>) إلى نمط إنتاجية غير منتظم، تميز بذروات وانخفاضات حادة، خاصة خلال الفترة الصباحية.

وقد سجل MSS-1 أعلى إنتاجية لحظية في هذا اليوم بحوالي  $2.8 \text{ L/m}^2$ ، بينما بلغ إنتاج MSS-2 نحو  $2.3 \text{ L/m}^2$ ، و TSS حوالي  $1.8 \text{ L/m}^2$ .

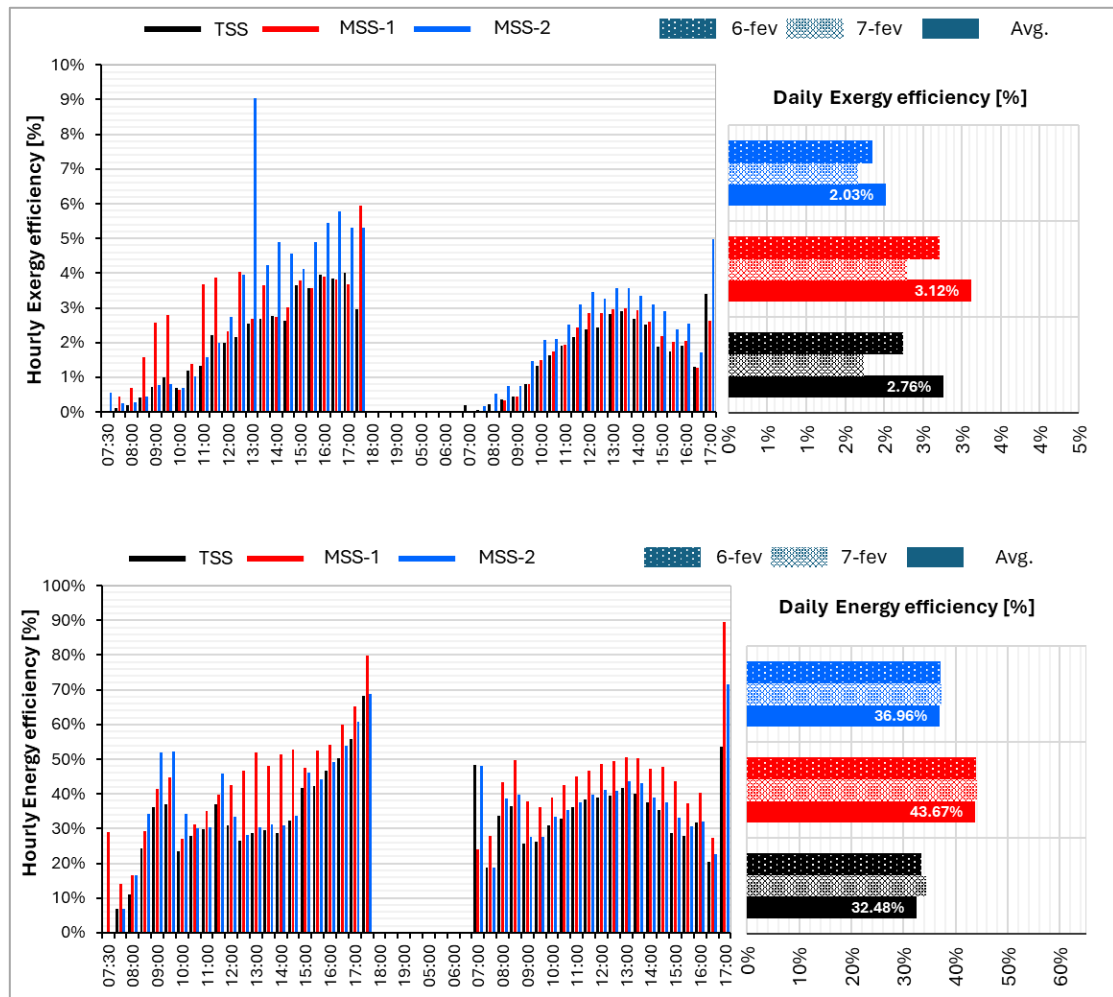


الشكل 28-3: التغيرات اليومية والساعية للإنتاجية على مدار 6 و7 يناير 2025

في المقابل، شهد يوم 7 يناير ظروفًا مناخية أكثر استقرارًا، مما سمح بزيادة تدريجية وثابتة في الإنتاجية بلغت ذروتها عند منتصف النهار، حيث سجل MSS-1 حوالي  $3.2 \text{ L/m}^2$ ، و MSS-2 حوالي  $2.7 \text{ L/m}^2$ ، في حين بلغ إنتاج TSS حوالي  $2.1 \text{ L/m}^2$ . واصل MSS-1 تفوقه على باقي المقطرات، مستفيدًا من المبادلة الحرارية التي يتميز بها، والتي حافظت على درجات حرارة ماء مرتفعة (بلغت حوالي  $50^\circ\text{C}$ )، مما أدى إلى تمديد فترة التبخر.

أما MSS-2، ورغم استفادته من نظام تبريد الزجاج الذي يُعزز التكاثف، فقد سجل إنتاجية أقل من MSS-1 خاصة خلال ساعات الذروة. بينما بقي TSS الذي لا يحتوي على أي تحسينات إضافية، الأقل إنتاجًا رغم أنه اتبع نمطًا مشابهًا لـ MSS-2. تؤكد هذه التحليلات أن استقرار الطقس يُساهم بشكل كبير في تحسين الإنتاجية، وأن MSS-1 يُعد النظام الأكثر كفاءة بفضل تفوقه في الإدارة الحرارية.

تشير الرسوم البيانية لكفاءة الطاقة والإكسيري إلى أداء المقطرات الشمسية الثلاثة تحت ظروف مناخية متغيرة (كما هو موضح في الشكل 3-29). في 6 يناير، أثرت التقلبات الجوية بشكل واضح على الكفاءة، حيث ظهرت تذبذبات حادة في القيم اللحظية. وقد بلغت الكفاءة القصوى للإكسيري 3.12% في نظام MSS-1، بينما سجل MSS-2 نحو 2.76% و TSS حوالي 2.03%. تتوافق هذه القيم المنخفضة مع تقلب الإشعاع الشمسي وارتفاع سرعة الرياح في ذلك اليوم.

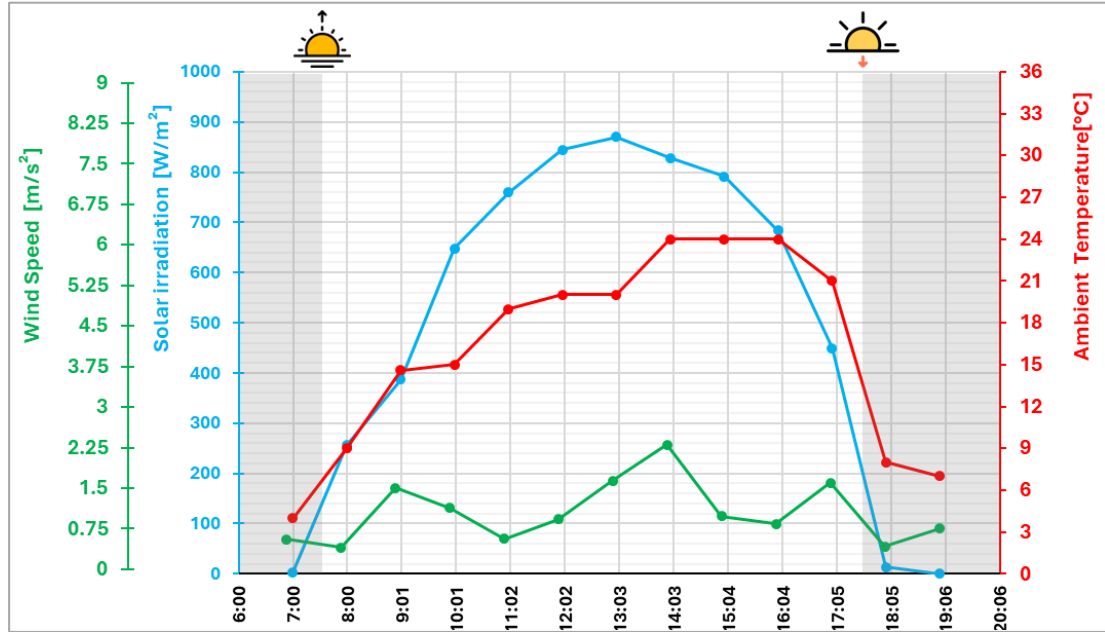


الشكل 3-29: تغيرات energy/exergy efficiency الساعية واليومية خلال أيام 6 و7 يناير 2025

أما في 7 يناير، فقد سمحت الظروف الجوية المستقرة بتحسّن ملحوظ في الكفاءة، حيث بلغت كفاءة الطاقة ذروتها عند 43.67% في MSS-1، و 36.96% في MSS-2، و 32.48% في TSS. ويعود ذلك الأداء المحسن لنظام MSS-1 إلى دمج نظام المحاكاة للطاقة الجوفية، والذي ساعد في الحفاظ على درجات حرارة مياه مرتفعة وتحسين استغلال الطاقة المتاحة (الإكسيري). بينما استفاد MSS-2 من نظام تبريد الزجاج، إلا أن أداءه ظل أدنى من MSS-1. وبقي TSS الأقل كفاءة بسبب تصميمه التقليدي، رغم اتباعه لنمط مشابه في التغيرات. تؤكد النتائج أهمية استقرار الأحوال الجوية في رفع كفاءة الأداء، كما تُبرز فعالية التحسينات الحرارية في تحسين كفاءة المقطرات الشمسية.

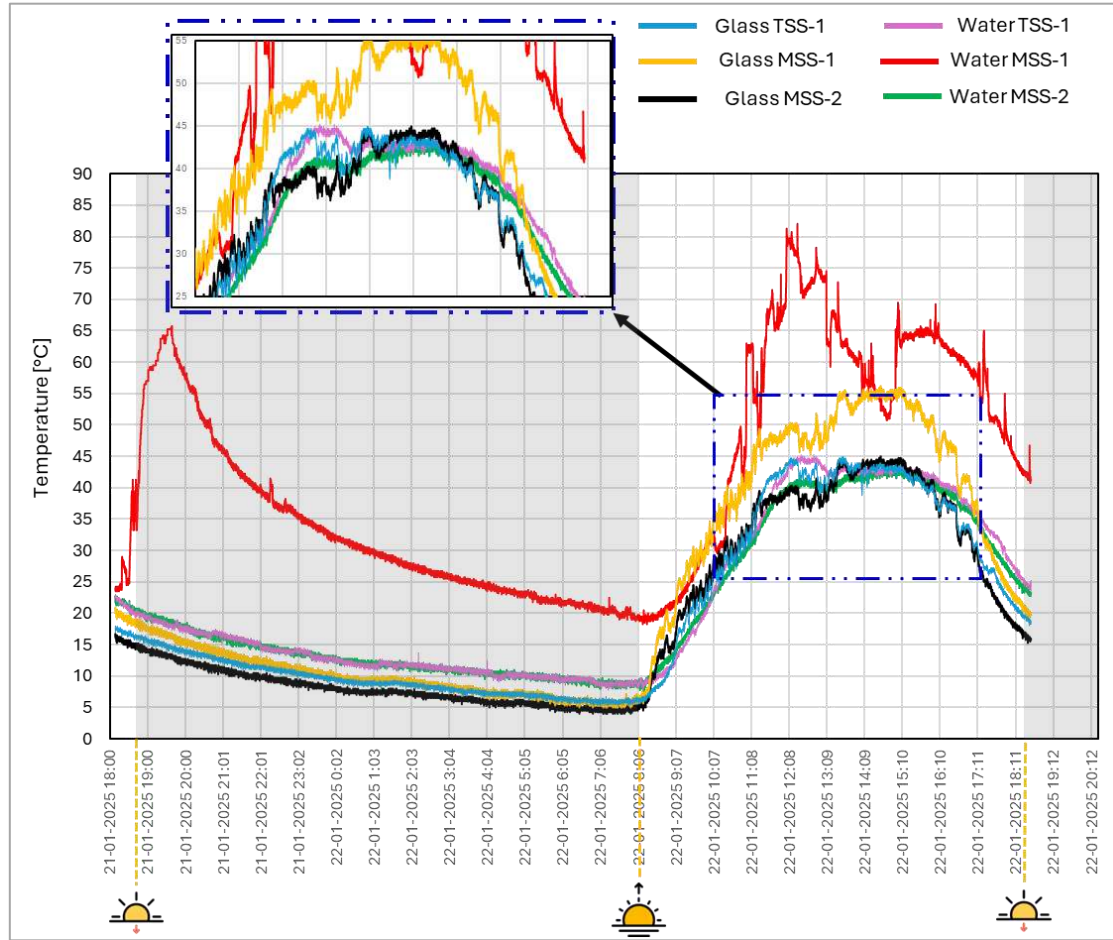
### 3-6-4-3 تأثير السماء الصافية والظروف المستقرة

في سيناريو السماء الصافية، تناولت الدراسة التجريبية مقارنة بين ثلاثة أنواع من المقطرات الشمسية TSS و MSS-1 و MSS-2 خلال فترة 24 ساعة (على مدار يومين متتاليين، 21 و 22 يناير). ركز التحليل على سلوكيات الإنتاجية وكفاءتي الطاقة والإكسيري في ظل ظروف مناخية مختلفة. يوضح الشكل 3-30 التغيرات في الإشعاع الشمسي، وسرعة الرياح، ودرجة حرارة الهواء المحيط طوال اليوم ضمن هذا السيناريو الثالث. وقد لوحظ أن الإشعاع الشمسي ارتفع تدريجيًا منذ الصباح الباكر، حتى بلغ ذروته عند قيمة  $870\text{W/m}^2$ . ويتوافق هذا الارتفاع في الطاقة الشمسية مع زيادة في درجة حرارة الهواء المحيط، بينما أظهرت سرعة الرياح تقلبات ملحوظة. عند الساعة 13:00، سُجل انخفاض طفيف في درجة حرارة الهواء بالتزامن مع ارتفاع في سرعة الرياح إلى  $2.3\text{m/s}$ ، ويُعزى هذا السلوك إلى زيادة تأثير التبريد بالحمل الناتج عن الرياح، والذي يحد من ارتفاع درجة حرارة الهواء. بعد ذلك، عادت درجة حرارة الجو إلى الارتفاع بشكل طفيف، قبل أن تبدأ بالانخفاض التدريجي من الساعة 16:00 فصاعدًا، حيث تراجعت من  $24^\circ\text{C}$  إلى حوالي  $8^\circ\text{C}$ ، بالتزامن مع تراجع الإشعاع الشمسي حتى غروب الشمس. أما بالنسبة لسرعة الرياح، فقد شهدت تقلبات واضحة طوال اليوم، مع اتجاه عام نحو الانخفاض مع اقتراب الليل، مما أدى إلى تراجع تأثير التبريد الطبيعي.



الشكل 3-30: التغيرات الساعية لدرجة حرارة المحيط، شدة الإشعاع الشمسي و سرعة الرياح خلال يوم 22 يناير 2025

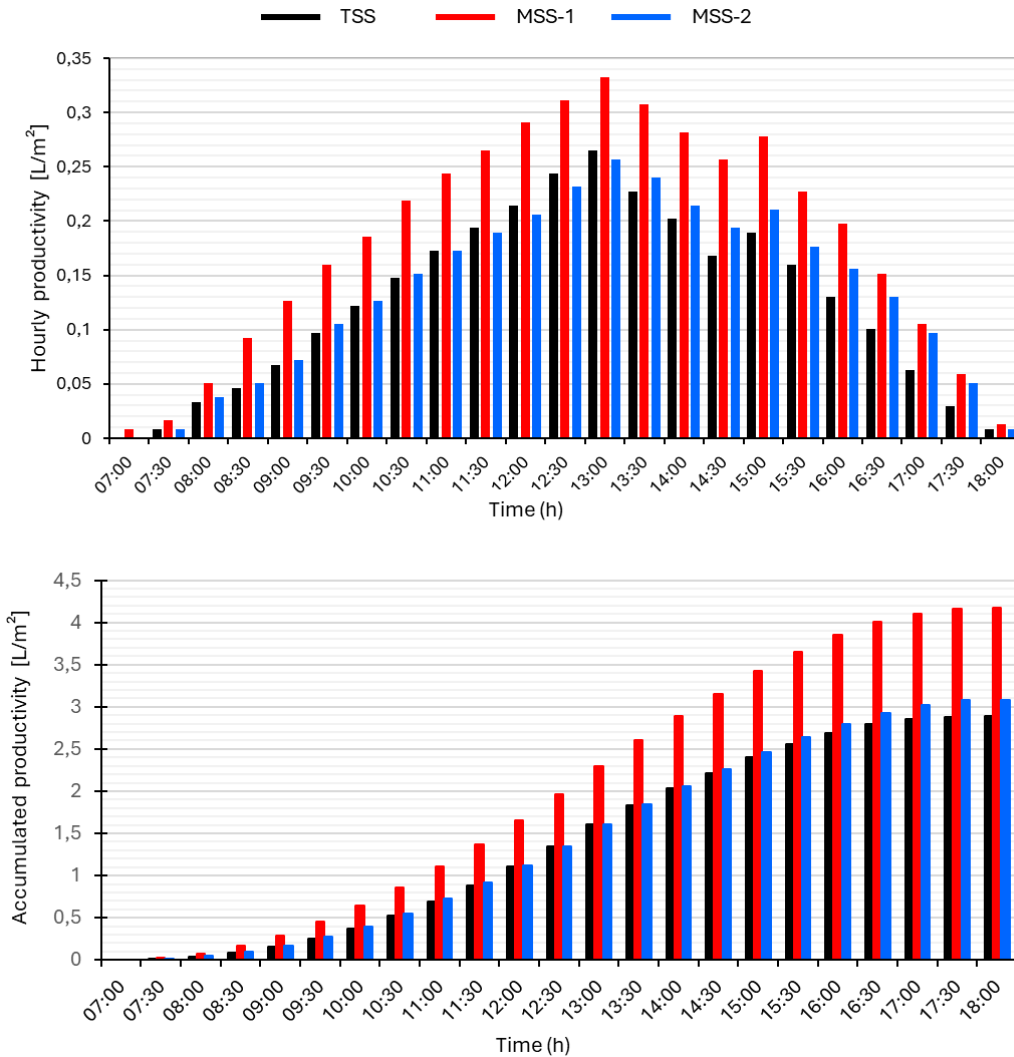
يوضح الشكل 3-31 تغيرات درجات حرارة الزجاج والماء داخل المقطرات الشمسية الثلاثة (TSS، MSS-1، MSS-2) على مدار اليوم. بعد غروب الشمس، خلال الفترة بين الساعة 19:00 و08:00، تبدأ درجات الحرارة في الانخفاض تدريجيًا نتيجة غياب الإشعاع الشمسي. ومع ذلك، يحتفظ نظام MSS-1 بدرجة حرارة ماء أعلى لفترة أطول مقارنةً بـ TSS وMSS-2، وذلك بفضل المبادلة الحرارية المتصلة بالمياه الجوفية، التي تقلل من الفاقد الحراري أثناء الليل. ومع استمرار انخفاض درجة حرارة الجو، تتراجع درجات حرارة الماء والزجاج بشكل أكبر. ومع شروق الشمس (في 22 يناير)، تبدأ مرحلة التسخين التدريجي، حيث ترتفع درجات حرارة الماء والزجاج استجابةً لزيادة الإشعاع الشمسي. إلا أن سرعة الرياح تؤثر سلبًا على هذا الارتفاع، حيث تسبب في تقلبات حرارية نتيجة تأثيرها بتبريد سطح الزجاج. خلال فترة الذروة التي تبدأ بعد الساعة 12:00 ظهرًا، تصل درجات حرارة الماء والزجاج إلى أقصى مستوياتها.



الشكل 3-31: التغيرات الساعية لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي والماء للمح لكل المقطرات الثلاثة خلال يوم 22 يناير 2025

وقد سجل نظام MSS-1 أعلى درجة حرارة للماء، في المقابل أظهر TSS درجة حرارة ماء أقل نسبيًا، بينما سجل MSS-2 أدنى درجة حرارة ماء. بعد الساعة 16:00، تبدأ درجات الحرارة في الانخفاض تدريجيًا مع تراجع الإشعاع الشمسي. ويستمر MSS-1 في الحفاظ على درجات حرارة أعلى لفترة أطول بفضل المبادلة الحرارية، مما

يسمح باستمرار عملية التبخر إلى ما بعد غروب الشمس. في المقابل، يشهد MSS-2 أسرع انخفاض في درجات الحرارة بسبب التبريد المستمر للزجاج، مما يقلل من الاحتفاظ الداخلي بالحرارة.



الشكل 3-32: التغيرات الساعية واليومية في الإنتاجية لكل المقطرات الثلاثة على مدار يوم 22 يناير 2025

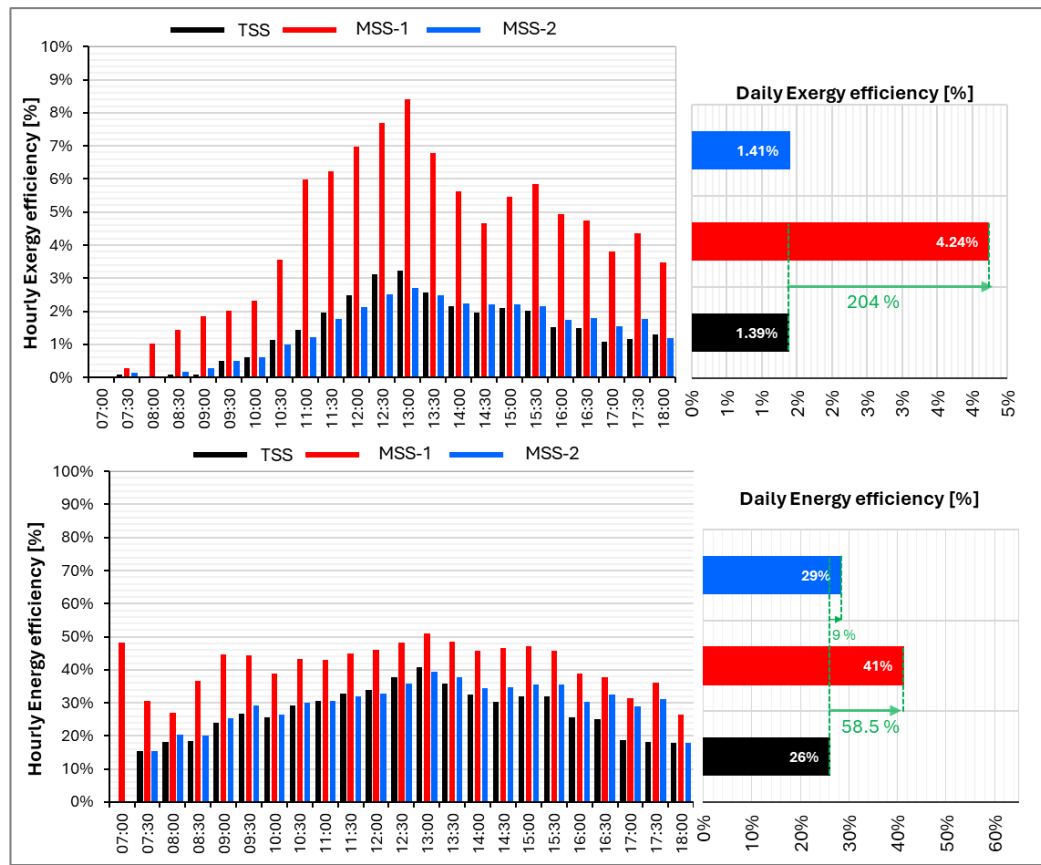
يوضح الشكل 3-32 تغيرات الإنتاجية للمقطرات الشمسية الثلاثة. في ساعات الصباح الباكر، تكون

الإنتاجية منخفضة، إلا أن MSS-1 يُظهر ارتفاعاً أسرع في الإنتاجية بفضل المبادلة الحرارية.

بين الساعة 10:00 و14:00، تزداد الإنتاجية مع ارتفاع الإشعاع الشمسي، وتبلغ ذروتها عند الساعة 13:00، حيث يسجل MSS-1 أعلى قيمة إنتاجية بمقدار  $0.33 \text{ L/m}^2$ . بعد ذلك، تبدأ الإنتاجية في الانخفاض تدريجياً، بينما يواصل MSS-1 تفوقه طوال اليوم. تبقى الفروقات في الإنتاجية التراكمية صغيرة خلال الفترة الصباحية، لكنها تتسع بمرور الوقت. وبحلول الساعة 13:00، يتجاوز MSS-1 إنتاجية TSS بنسبة تقارب 40%. بعد الساعة 14:00، يتحسن أداء MSS-2 بفضل نظام تبريد الزجاج الذي يُعزز من فعالية التكاثر. مع نهاية اليوم، يسجل MSS-1 أعلى إنتاجية تراكمية ( $4.1 \text{ L/m}^2$ )، يليه MSS-2 بـ ( $3.08 \text{ L/m}^2$ )، ثم TSS بـ ( $2.8 \text{ L/m}^2$ ).

وبشكل عام، يُعزز MSS-1 كفاءة التبخر من خلال المبادلة الحرارية، بينما يستفيد MSS-2 من تحسين التكاليف بفضل تبريد الزجاج. أما TSS، فقد أظهر أداءً متوسطاً، وبقي قريباً نسبياً من MSS-2 من حيث الإنتاج الكلي.

يُحلل الشكل 3-33 كفاءة الإكسيري والبطاقة للمقطرات الشمسية الثلاثة (MSS-2، MSS-1، TSS) على مدار اليوم. في الصباح الباكر (من 07:00 إلى 10:00)، تبقى كفاءة الإكسيري منخفضة (أقل من 2%) بسبب انخفاض درجة حرارة الماء، إلا أن MSS-1 يُظهر تفوقاً مبكراً بفضل المبادلة الحرارية. ومع ارتفاع درجات الحرارة، ترتفع كفاءة الإكسيري لتبلغ ذروتها عند الساعة 13:00، حيث تتجاوز MSS-1 نسبة 8%، في حين يسجل كل من TSS و MSS-2 حوالي 3%.



الشكل 3-33: تغيرات energy/exergy efficiency والساعية واليومية لكل المقطرات خلال 22 يناير 2025

بعد الظهر، تبدأ كفاءة الإكسيري في الانخفاض مع تراجع الإشعاع الشمسي. وبشكل عام، يحقق MSS-1 متوسط كفاءة إكسيري قدره 4.24%، متفوقاً على TSS (1.39%) بنسبة 204%، بينما يسجل MSS-2 نسبة 1.41%، وهي قريبة من TSS. أما كفاءة الطاقة، فتتبع نمطاً مشابهاً، حيث ترتفع مع زيادة الإشعاع الشمسي وتبلغ ذروتها عند الساعة 13:00، مسجلةً 51% في MSS-1، مقارنةً بـ 41% في TSS و 40% في MSS-2. ثم تنخفض الكفاءة تدريجياً مع انخفاض الإشعاع الشمسي. ويُعد MSS-1 الأعلى من حيث متوسط كفاءة الطاقة بنسبة 41%، متفوقاً على TSS (26%) بفارق 58.5%، في حين يسجل MSS-2 نسبة 29%، أي أعلى من TSS بنسبة 9% فقط. تُبرز هذه النتائج الأداء المتفوق لنظام MSS-1، بفضل المبادلة الحرارية التي تُحافظ على درجات حرارة ماء

مرتفعة وتُعزز التبخر. أما MSS-2، فيستفيد من تحسين التكاليف بفضل تبريد الزجاج، إلا أن انخفاض درجة حرارة الماء يحد من كفاءته العامة. في المقابل، يفتقر TSS لأي آليات تحسين، مما يجعله يُظهر أداءً معتدلاً، لكنه يبقى قريباً من MSS-2. وبوجه عام، يُثبت MSS-1 أنه النظام الأكثر كفاءة في تحقيق أقصى إنتاجية.

### 4-6-4-3 التحليل الاقتصادي لجميع السيناريوهات

تُعد تكلفة اللتر المنتج (CPL) مؤشراً أساسياً لقياس الجدوى الاقتصادية، حيث تشير القيم المنخفضة لـ CPL إلى أنظمة أكثر فعالية من حيث التكلفة. وقد أُجري تحليل اقتصادي مفصل لجميع المقطرات الشمسية، وفق المنهجية الموضحة في القسم 2.5، على مدار دورة سنوية كاملة (365 يوماً)، باعتماد معدل فائدة قدره 10% وعمر افتراضي للنظام يبلغ 10 سنوات (Ghandourah et al., 2022). تم تلخيص نتائج هذا التحليل في الجدول 3-7.

الجدول 3-7: التحليل الاقتصادي وتحليل Exergo-Economic للمقطرات الشمسية تحت كل السيناريوهات

Exergo-economic analysis	i (%) = 10 %										نوع المقطر	السيناريو
	CPL (دولار/لتر/م <sup>2</sup> )	الإنتاجية (لتر/م <sup>2</sup> /السنة)	TAC (\$)	AMC (\$)	ASV (\$)	SV (\$)	SFF (\$)	FAC (\$)	CRF (\$)	Ps (\$)		
1,92	<b>0,0114</b>	930,93	10,66	1,49	0,76	12,21	0,062	9,94	0,16	61,09	TSS	سيناريو 01
1,64	<b>0,0107</b>	1290,4	13,89	1,94	0,99	15,91	0,062	12,95	0,16	79,59	MSS1	
1,65	0,0121	973,17	11,80	1,49	0,76	12,21	0,062	9,94	0,16	67,59	MSS2	
1,66	<b>0,0167</b>	635,98	10,66	1,49	0,76	12,21	0,062	9,94	0,16	61,09	TSS	سيناريو 02
1,56	<b>0,0156</b>	887,15	13,89	1,94	0,99	15,91	0,062	12,95	0,16	79,59	MSS1	
1,14	0,0171	689,75	11,80	1,49	0,76	12,21	0,062	9,94	0,16	67,59	MSS2	
1,73	<b>0,0101</b>	1055,366	10,66	1,49	0,76	12,21	0,062	9,94	0,16	61,09	TSS	سيناريو 03
3,89	<b>0,0091</b>	1522,37	13,89	1,94	0,99	15,91	0,062	12,95	0,16	79,59	MSS1	
1,52	0,0104	1 127,57	11,80	1,49	0,76	12,21	0,062	9,94	0,16	67,59	MSS2	

يتضح أن إنتاج المياه السنوي (M) يُعد العامل الأساسي الذي يؤثر على تكلفة اللتر. فكلما زادت كمية المياه المنتجة سنوياً، انخفضت CPL. على سبيل المثال، في 30 أكتوبر، حقق نظام MSS-1 إنتاجية مرتفعة تبلغ 1290.4 لتر/م<sup>2</sup>/سنة، مما أدى إلى خفض CPL إلى 0.0107 دولار، وهي أقل من TSS (0.0114 دولار) و MSS-2 (0.0121 دولار). وعلى العكس من ذلك، أدى انخفاض الإنتاجية في 6 يناير، الناتج غالباً عن سوء الأحوال الجوية، إلى ارتفاع قيم CPL في جميع المقطرات. من حيث الأداء المقارن، يُظهر MSS-1 باستمرار أدنى قيمة لـ CPL، ويرجع ذلك إلى دمج الطاقة الجوفية، الذي يعزز معدلات التبخر ويُحافظ على إنتاجية مياه مرتفعة. مما يساهم في توزيع التكاليف الكلية على كمية إنتاج أكبر. ففي 22 يناير، بلغ إنتاج MSS-1 حوالي 1522.37 لتر/م<sup>2</sup>/سنة، مما أدى إلى تقليص CPL إلى 0.0091 دولار، متفوقاً على TSS (0.0101 دولار) و MSS-2 (0.0104 دولار). أما عند مقارنة TSS و MSS-2، فتكون الفروقات في CPL أحياناً طفيفة. ففي 6 يناير، أنتج TSS

حوالي 635.98 لتر/م<sup>2</sup>/سنة بتكلفة CPL قدرها 0.0167 دولار، بينما MSS-2 أنتج 689.75 لتر/م<sup>2</sup>/سنة ولكن بتكلفة أعلى نسبيًا (0.0171 دولار). ويُعزى هذا الفرق البسيط إلى التباينات في التكاليف السنوية الكلية (TAC) وسعر النظام الابتدائي (Ps)، مما يُبرز كيف أن التغيرات المتوسطة في الإنتاجية قد تؤثر بشكل ملموس على الجدوى الاقتصادية.

من جهة أخرى، يُضيف مؤشر Exergo-Economic بُعدًا آخر في التحليل، إذ يُظهر مدى كفاءة استخدام الطاقة مقارنةً بالتكلفة الاقتصادية. فعلى الرغم من أن TSS سجل مؤشرًا مرتفعًا نسبيًا (1.92) في 30 أكتوبر، إلا أن MSS-1 وصل إلى 3.89 في 22 يناير، مما يُبرز تأثير دمج الطاقة الجوفية على كل من كفاءة استغلال exergy والعائد الاقتصادي في حال ارتفاع الإنتاجية. أما MSS-2، فقد تراوح مؤشره بالقرب من TSS، ما يعكس مكاسب متوسطة في الكفاءة، لكنها لا تُترجم دائمًا إلى تحسن ملموس في المؤشرات الاقتصادية.

يؤكد هذا التحليل أن النظام MSS-1 هو الأكثر كفاءة وجدوى اقتصادية بفضل تكامل التصميم الحراري، بينما MSS-2 يُظهر تحسنًا معتدلًا، و يبقى TSS الأقل فعالية من حيث الأداء الاقتصادي، لكنه في بعض الحالات يقترب من MSS-2 عندما تكون الإنتاجية متقاربة.

### 3-4-5 فترة الاسترداد (Payback Period)

تُعد فترة الاسترداد من المؤشرات المالية الهامة المستخدمة لتحديد المدة اللازمة لاسترجاع تكلفة الاستثمار الأولي، كما هو موضح في الجدول 3-8. وقد أظهر النظام MSS-1 أفضل أداء من حيث العائد والتكلفة، حيث سجل أقصر فترة استرداد في جميع الأيام المدروسة، مما يجعله الأكثر جدوى من الناحية الاقتصادية على المدى الطويل. في 22 يناير 2025، حقق MSS-1 أدنى فترة استرداد بلغت 70.67 يومًا، مقارنةً بـ 78.25 يومًا لنظام TSS و 73.24 يومًا لم MSS-2، وذلك بفضل ارتفاع الإنتاجية اليومية.

ومن ناحية أخرى، تُظهر الأيام الغائمة مثل 30 أكتوبر و 6 يناير انخفاضًا ملحوظًا في الإنتاجية، مما يؤدي إلى زيادة فترة الاسترداد. ويُعزى هذا الارتفاع إلى الانخفاض الموسمي في الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الجو، مما يؤثر سلبًا على إنتاجية المياه وبالتالي يُطيل المدة اللازمة لاسترجاع التكاليف الاستثمارية.

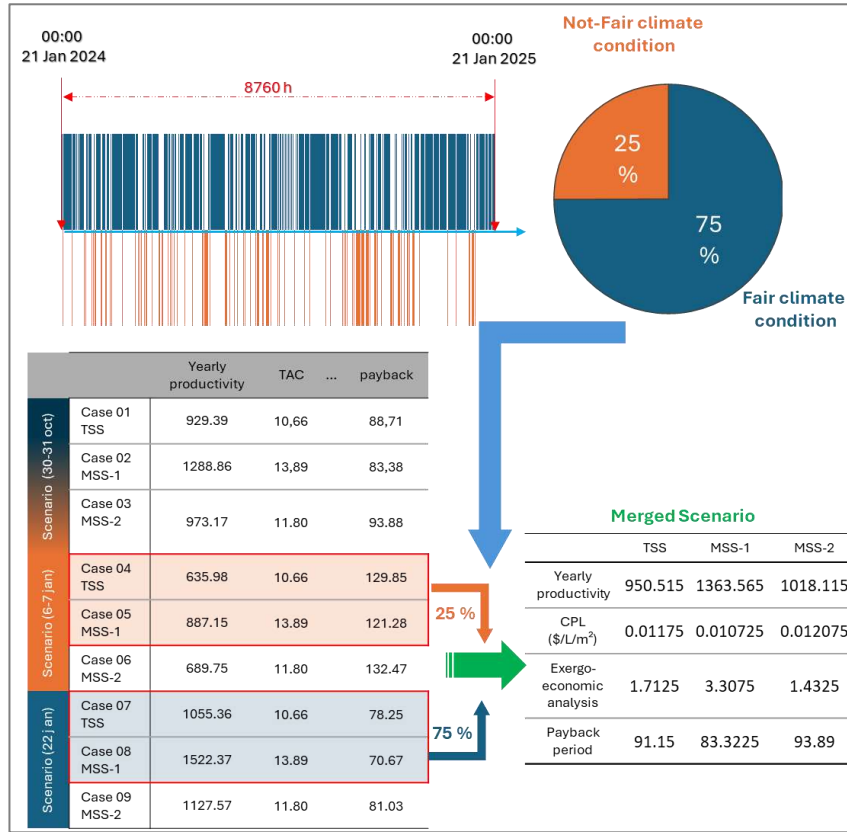
الجدول 3-8: تحليل فترة الاسترداد للمقطرات الشمسية تحت سيناريوهات تشغيل مختلفة

سعر الماء في السوق = 0,27 دولار/لتر			نوع المقطر	السيناريوهات
فترة الاسترداد (اليوم)	الرياح (دولار/م <sup>2</sup> /اليوم)	الإنتاجية (لتر/م <sup>2</sup> )		
88,71	0,68	2,55	TSS	سيناريو 01
83,38	0,95	3,53	MSS1	
93,88	0,71	2,66	MSS2	
129,85	0,47	1,74	TSS	سيناريو 02
121,28	0,65	2,43	MSS1	
132,47	0,51	1,88	MSS2	
78,25	0,78	2,89	TSS	سيناريو 03
70,67	1,12	4,17	MSS1	
81,03	0,83	3,08	MSS2	

### 3-4-6-6 دمج التغيرات المناخية في توقعات الأداء

تحلل هذه الفقرة بيانات الطقس السنوية على مدار 8760 ساعة لتقدير الأداء السنوي الفعلي استناداً إلى الظروف المناخية الحقيقية، بدلاً من الافتراض التقليدي بوجود طقس مثالي وثابت طوال العام. تشير البيانات إلى أن 75% من السنة كانت تحت ظروف جوية معتدلة أو مناسبة، في حين سادت ظروف غير مواتية خلال 25% من الوقت. بناءً على ذلك، تم اختيار حالتين رئيسيتين من بين ثلاث سيناريوهات مختلفة تمثل إحداهما الأداء الأمثل في ظل طقس مناسب، والأخرى الأداء الأسوأ في ظل ظروف مناخية سيئة.

لتحقيق تمثيل دقيق للواقع، تم حساب الأداء السنوي الفعلي من خلال وزن نتائج كل حالة بالنسبة المئوية لحدوثها، مما أتاح تقديرًا أكثر واقعية للإنتاجية، والتكلفة الإجمالية، وفترة الاسترداد، كما هو موضح في الشكل 3-34.



الشكل 3-34: تقدير الأداء السنوي بناء على الظروف المناخية الفعلية

تُبرز هذه الدراسة أهمية دمج بيانات الطقس الحقيقية في توقعات الأداء، لتقليل الانحرافات الناتجة عن افتراضات غير واقعية. من خلال هذه المنهجية، يمكن تحسين دقة التقديرات السنوية للإنتاجية والتكاليف وفترة الاسترداد بشكل كبير، مما يساهم في اتخاذ قرارات تشغيلية واستثمارية أكثر فاعلية. ويمكن تعزيز هذا النموذج أكثر من خلال مراعاة التغيرات الموسمية بدلاً من الاعتماد على المتوسطات السنوية فقط، الأمر الذي يوفر توقعات أكثر دقة لأداء النظام في الظروف الحقيقية.

### 7-4-3 خلاصة التجربة الثانية

هدفت هذه التجربة إلى تقييم أداء ثلاثة نماذج مختلفة من المقطرات الشمسية، وهي: المقطر الشمسي التقليدي (TSS)، والمقطر المعدل الأول (MSS-1) المدمج بمصدر حراري أرضي، والمقطر المعدل الثاني (MSS-2) المزود بألية تبريد الزجاج، وذلك تحت ظروف مناخية متنوعة شملت أجواءً مستقرة، وتغيرات متقطعة في الإشعاع الشمسي والرياح، وتأثيرات رياح شديدة مع تقلبات شمسية.

أظهرت النتائج التجريبية ما يلي:

✓ تؤثر التغيرات المناخية بشكل كبير على كفاءة المقطر الشمسي وإنتاجية المياه العذبة والجدوى الاقتصادية للنظام.

✓ تفوق نموذج MSS-1 على كل من TSS و MSS-2 من حيث الاحتفاظ بالحرارة والكفاءة الطاقوية والإنتاجية الكلية للمياه، حيث بلغ أقصى ارتفاع في درجة حرارة الماء  $64^{\circ}\text{C}$  مع إنتاجية يومية وصلت إلى  $4.17\text{L}/\text{m}^2$ ، مقارنة بـ  $3.08\text{L}/\text{m}^2$  و  $58^{\circ}\text{C}$  و  $2.89\text{L}/\text{m}^2$  و  $53^{\circ}\text{C}$  لـ TSS.

✓ في ظل ظروف مناخية غير مستقرة تتسم برياح قوية وتغيرات شمسية، سجل MSS-1 أعلى كفاءة طاقوية بلغت 43.67%، متفوقاً على MSS-2 (36.96%) و TSS (32.48%)، كما حقق أعلى كفاءة إكسرجية عند 4.24%، مما يعكس فاعلية دمج المصدر الحراري الأرضي في تعزيز التبخر والتكثف.

✓ من الناحية الاقتصادية، كان MSS-1 الأفضل أداءً، حيث حقق أقل تكلفة لكل لتر (0.0091 دولار/لتر) وأسرع فترة استرداد للاستثمار بـ 70.7 يوماً، مقارنة بـ 78.3 يوماً لـ TSS و 73.2 يوماً لـ MSS-2، إلى جانب تسجيله لأعلى مؤشر Exergoeconomic بلغ 3.89، مقابل 1.92 لـ TSS و 1.65 لـ MSS-2.

✓ ساهم دمج بيانات مناخية واقعية طويلة الأمد (تشير إلى أن 75% من السنة كانت ذات طقس ملائم و 25% ذات ظروف غير مواتية) في تحسين دقة التنبؤات السنوية للإنتاج، وتقليل الأخطاء الناتجة عن افتراض ظروف مثالية ثابتة. وكنتيجة لذلك، حقق MSS-1 إنتاجاً سنوياً بلغ  $1522.37\text{ لتر}/\text{م}^2$ ، مقارنة بـ  $1127.57\text{ لتر}/\text{م}^2$  و  $1055.37\text{ لتر}/\text{م}^2$  لـ TSS.

تؤكد هذه الدراسة أن تجاهل التغيرات المناخية الواقعية قد يؤدي إلى مبالغة في تقدير الأداء والتقليل من تقدير التكاليف وفترة الاسترداد. ومن خلال دمج التوزيعات المناخية الحقيقية، يتم التوصل إلى تقييم أكثر دقة وواقعية، مما يتيح اتخاذ قرارات أفضل في التخطيط التشغيلي والتوقعات المالية. ويمكن لنماذج المستقبل أن تستفيد أكثر من خلال إدراج التحليلات الموسمية والإقليمية لتحسين دقة توقعات الأداء بشكل أكبر.

### 5-3 الخاتمة

أظهرت الدراسات التجريبية أن تحسين أداء المقطر الشمسي يمكن تحقيقه من خلال تعديلات تصميمية وهجينة مختلفة، غير أن التفوق الحراري لا ينعكس دائماً على الجدوى الاقتصادية. فقد بينت التجارب أن إضافة عناصر مثل الألواح العاكسة أو مصادر حرارية مساعدة تُسهم بوضوح في رفع إنتاجية المياه وكفاءة التحويل الطاقوي، إلا أن الكلفة الاستثمارية الإضافية قد تحدّ من الجدوى طويلة الأمد.

كما أبرزت النتائج أن العوامل المناخية الواقعية – من إشعاع شمسي ورياح وتقلبات حرارية – تؤثر بشكل حاسم على أداء المقطر واستقراره الاقتصادية. وقد أثبت المقطر المدمج بالمصدر الحراري الأرضي (MSS1) تفوقاً من حيث الكفاءة الحرارية والإكسرجية، وانخفاض تكلفة اللتر المنتج، وسرعة استرداد الاستثمار، خاصة عند اعتماد بيانات مناخية حقيقية تعكس التغيرات الموسمية الفعلية.

بناءً على ذلك، يمكن الاستنتاج أن دمج الحلول التصميمية الذكية مع تحليل واقعي للظروف المناخية يمثل خطوة أساسية نحو تطوير مقطرات شمسية أكثر كفاءة واستدامة، تجمع بين الأداء الحراري العالي والجدوى الاقتصادية المتوازنة.

# الفصل 4: تحليل أداء المقطر الشمسي باستخدام تقنيات التعلم الآلي

## 1-4 المقدمة

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في أدوات الذكاء الاصطناعي، مما دفع الباحثين إلى الاستفادة من هذه التقنيات في مجالات متعددة، منها تحسين أداء أنظمة التقطير الشمسي. يهدف هذا الفصل إلى استعراض كيفية تعامل نماذج التعلم الآلي مع البيانات التجريبية الناتجة عن اختبار المقطر الشمسي على مدى مدة التجربة، وتقييم فعالية هذه النماذج في التنبؤ بكمية الماء المقطر. كما يسعى الفصل إلى استكشاف الفروق بين النماذج المختلفة من حيث الدقة والموثوقية، وتقديم توصيات عملية لتطبيقها في تصميم وتشغيل المقطر الشمسي.

## 2-4 وصف البيانات والنتائج التجريبية

من خلال التجارب الميدانية المتطرق إليها سابقا في الفصل السابق يتم استغلال البيانات المتحصل عليها في تقنيات التعلم الآلي، حيث يمكن بناء نماذج تنبؤية قادرة على التعمق في العلاقات غير الخطية بين هذه المتغيرات وإنتاج الماء. تتمثل المتغيرات الأساسية في:

$T_{glass\_in}$  (°C): درجة حرارة الجانب الداخلي للزجاج.

$T_{glass\_out}$  (°C): درجة حرارة الجانب الخارجي للزجاج.

$T_{water}$  (°C): درجة حرارة الماء في حوض المقطر.

$T_{ambient}$  (°C): درجة الحرارة المحيطة.

$wind\_speed$  (m/s): سرعة الرياح.

$irradiance$  (W/m<sup>2</sup>): شدة الإشعاع الشمسي.

$water\_out$  (ml): كمية الماء المنتجة خلال الفترة الزمنية.

توجد متغيرات أخرى في المقطرات المحسنة لكن لم يتم ادراجها لانها لها تأثير على المتغيرات الأساسية.

## 3-4 منهجية النمذجة والتقييم

تُعد لغة بايثون (Python) من أكثر لغات البرمجة استخدامًا في مجالات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات نظرًا لبساطتها ووفرة مكتباتها المتخصصة، حيث تتميز كل مكتبة بوظائف محددة تساعد الباحث على

تنفيذ مختلف المراحل التجريبية. فمثلاً، تُستخدم مكتبة Pandas في قراءة البيانات وتنظيمها ومعالجتها، بينما توفر مكتبة NumPy إمكانيات متقدمة لإجراء الحسابات العددية والمصفوفات. أما مكتبة scikit-learn فهي الأداة الأساسية لبناء نماذج التعلم الآلي وتدريبها وتقييمها، في حين تُستعمل مكتبة math في تنفيذ العمليات الرياضية الأساسية كالجذر التربيعي وحساب بعض المؤشرات الإحصائية.

ولتطبيق نماذج التعلم الآلي على بيانات المقطر الشمسي باستخدام بايثون، يتم اتباع خطوات عملية واضحة تبدأ أولاً باستيراد المكتبات الضرورية ثم تحميل ملف البيانات (عادة بصيغة CSV أو Excel) وفصل متغيرات الإدخال (مثل درجة حرارة الزجاج الداخلي والخارجي، درجة حرارة الماء والهواء، سرعة الرياح، شدة الإشعاع) عن المتغير الهدف المتمثل في كمية الماء المقطر. بعد ذلك يتم تقسيم البيانات إلى جزأين: بيانات التدريب 70% وبيانات الاختبار 30% لضمان موضوعية التقييم. في الخطوة الموالية، تُنشأ النماذج الخمسة محل الدراسة وهي: الانحدار الخطي (Linear Regression)، شجرة القرار (Decision Tree)، الغابة العشوائية (Random Forest)، الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP)، وآلة المتجهات الداعمة (SVM). يقوم كل نموذج بالتدريب على مجموعة التدريب ثم التنبؤ بالقيم باستخدام مجموعة الاختبار.

بعد تنفيذ التنبؤات، يتم حساب مؤشرات تشمل: معامل الارتباط (R) الذي يوضح قوة العلاقة بين القيم الفعلية والمتوقعة، وهو الجذر التربيعي لمعامل التحديد ( $R^2$ ) و تتراوح قيمة R بين 0 و 1، ويمكن حسابها باستخدام معادلة 4-1 و معادلة 4-2 (Abd Elaziz, Senthilraja, et al., 2021).

معادلة 4-1

$$R = \sqrt{R^2}$$

معادلة 4-2

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n_s} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^{n_s} (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^{n_s} (y_i - \bar{y})^2}$$

ومتوسط الخطأ المطلق (MAE) الذي يقيس متوسط الانحراف بين القيم ويعطى بالمعادلة 4-3 (Elsheikh et al., 2021).

معادلة 4-3

$$MAE = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} |x_i - y_i|$$

الجذر التربيعي لخطأ التربيع المتوسط (RMSE) الذي يبرز حجم الخطأ بين البيانات المتوقعة والبيانات المبلغ عنها، ويمكن حسابه باستخدام معادلة 4-4 (Al-qaness et al., 2023).

$$\text{معادلة 4-4} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} (x_i - y_i)^2}$$

إضافة إلى مؤشرين نسبيين هما RAE (نسبة الخطأ المطلق) و RRSE (نسبة الجذر التربيعي لخطأ التربيع) حسب المعادلة 4-5 والمعادلة 4-6 (Elsheikh et al., 2019).

$$\text{معادلة 4-5} \quad RAE = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right|$$

$$\text{معادلة 4-6} \quad RRSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_s} (x_i - \bar{x})^2}}$$

يتم أخيراً عرض النتائج في جدول مقارن يوضح بدقة أداء كل نموذج، مما يتيح اختيار النموذج الأمثل للتنبؤ بسلوك المقطر الشمسي وتطوير تصميماته المستقبلية.

اختيرت هذه النماذج لشيوع استخدامها في الدراسات العلمية (Murugan et al., 2023) وتنوع قدراتها في معالجة بيانات مختلفة من حيث التعقيد والشكل، فضلاً عن توازنها بين الدقة وقابلية التفسير. تُطبَّق الشيفرة بنفس الإعدادات على البيانات المحضرة من التجريبتين لضمان الاتساق في المقارنة بين أداء النماذج.

### 1-3-4 الانحدار الخطي (Linear Regression - LR)

الانحدار الخطي (Linear Regression) يعد من أقدم خوارزميات التعلم الآلي ذات الطابع الإشرافي، ويُستخدم للتنبؤ متغير هدف مستمر بالاعتماد على متغير واحد أو أكثر من المدخلات. يقوم هذا النموذج على صياغة علاقة رياضية خطية بين الخصائص المستقلة والمتغير التابع من خلال معادلة خطية بسيطة. ورغم بساطته وسهولة تفسيره، إلا أن الانحدار الخطي يعاني من عدة قيود. فهو يفترض أن العلاقة بين المتغيرات خطية دائماً، مما قد يؤدي إلى تنبؤات غير دقيقة إذا كانت العلاقة الحقيقية غير خطية. كما أنه حساس جداً للقيم المتطرفة (Outliers) التي قد تؤثر على معاملات النموذج وتضعف من أدائه. إضافة إلى ذلك، يعتمد الانحدار الخطي على فرضية تجانس التباين (Homoscedasticity)، أي أن تباين الأخطاء (المتبقيات) ثابت عبر

جميع مستويات المتغيرات المستقلة، وفي حال انتهاك هذا الافتراض تصبح التقديرات أقل كفاءة ودقة (Huang et al., 2021).

### 2-3-4 شجرة القرار (Decision tree - DT)

شجرة القرار هي نموذج يعتمد على البنية الشجرية، يعمل على تقسيم مجموعة البيانات بشكل متكرر إلى مجموعات فرعية أصغر استنادًا إلى قيم المتغيرات (الخصائص). يبدأ النموذج بعقدة الجذر التي تمثل كامل مجموعة البيانات، ثم تُقسّم هذه العقدة إلى عقد فرعية (Child Nodes) وفقًا لقيمة متغير معين. وتستمر عملية التقسيم بشكل متتابع لكل عقدة فرعية حتى الوصول إلى العقد النهائية (Leaf Nodes) التي تُعبر عن المخرجات أو التنبؤات النهائية. يعتمد خوارزم القرار على تكرار عملية التقسيم بهدف تحقيق أعلى درجة من التجانس الداخلي داخل المجموعات الناتجة. يتميز هذا النموذج ببساطته وسهولة تفسيره، كما يمكنه التعامل مع العلاقات الخطية وغير الخطية على حد سواء. إضافة إلى ذلك، فإن سهولة تمثيله بصريًا تجعل منه أداة فعالة لفهم عملية اتخاذ القرار وتوضيح العلاقة بين المتغيرات المستقلة والتابعة (Murugan et al., 2023).

### 3-3-4 الشبكة العصبية متعددة الطبقات (Multilayer Perceptron - MLP)

يُعدّ المُدرِّك متعدد الطبقات (Multilayer Perceptron - MLP) أحد النماذج الأساسية في بنية الشبكات العصبية الاصطناعية ويُستخدم على نطاق واسع في تقنيات التعلّم العميق. يقوم هذا النموذج على مبدأ تنظيم العُقد العصبية (Neurons) في طبقات متسلسلة تشمل طبقة إدخال، وطبقة أو أكثر مخفية، وطبقة إخراج. وتعتمد كل خلية عصبية على جمع مدخلاتها وفق أوزان محددة، ثم تطبيق دالة تنشيط لإنتاج المخرجات ونقلها إلى الطبقة التالية.

يتم تدريب النموذج عبر تعديل الأوزان والانحيازات باستخدام خوارزميات مثل الانتشار العكسي (Backpropagation) والانحدار التدرجي (Gradient Descent) بهدف تقليل الفارق بين القيم المتوقعة والقيم الحقيقية. ويمتاز الـ MLP بمرونته وقدرته العالية على تمثيل العلاقات غير الخطية بين البيانات، مما يجعله فعالاً في العديد من التطبيقات (Afzal et al., 2023).

### 4-3-4 الغابة العشوائية (Random Forest - RF)

تُعدّ الغابة العشوائية (Random Forest - RF) إحدى أكثر تقنيات التعلم التجميعي (Ensemble Learning) مرونةً وقوةً، وتُستخدم في مهام التصنيف (Classification) والانحدار (Regression) على حد سواء. تقوم آلية عملها على إنشاء عدد كبير من أشجار القرار (Decision Trees) أثناء مرحلة التدريب، ثم بعد اكتمال النموذج يتم تجميع نتائج هذه الأشجار بآلية تصويت الأغلبية لاستخراج الفئة الأكثر تكرارًا في حالة التصنيف،

أو حساب المتوسط الحسابي للتنبؤات في حالة الانحدار. وتمتاز هذه المنهجية بقدرتها على تقليل التباين (Variance) مقارنةً باستخدام شجرة قرار واحدة، مما يرفع من دقة التنبؤ ويجعل النموذج أكثر مقاومة لفرط التكيف (Overfitting). كما أن الغابة العشوائية تُستخدم على نطاق واسع في التطبيقات العملية، مثل التنبؤات المناخية، وتحليل البيانات الطبية، ومعالجة الصور، بفضل بساطتها النسبية وفعاليتها العالية (Yang et al., 2020).

### 5-3-4 آلة المتجهات الداعمة (Support vector machine - SVM)

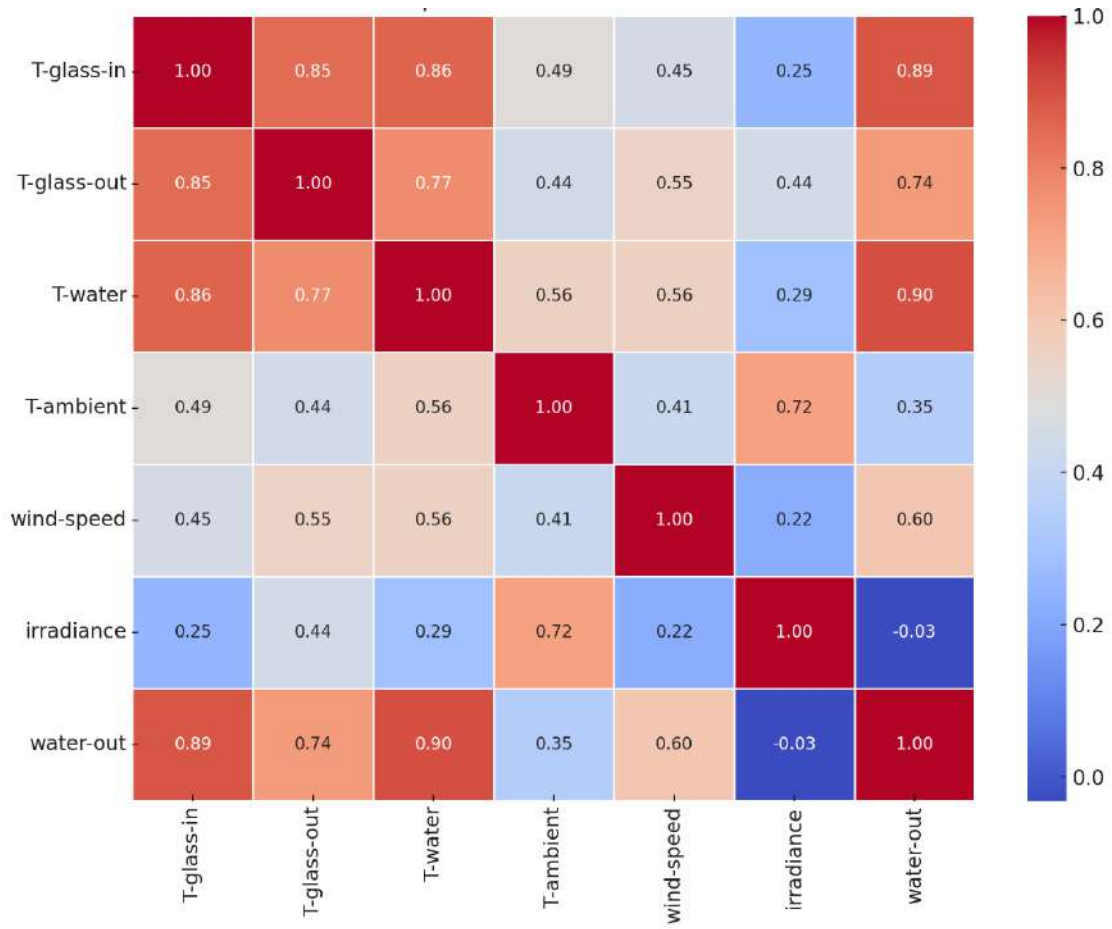
تُعدّ آلة المتجهات الداعمة (SVM) من أقوى خوارزميات التعلم الآلي، حيث تهدف إلى إيجاد المستوى الفائق الأمثل الذي يفصل بين الفئات مع تعظيم الهامش بينها وتقليل أخطاء التصنيف. وتمتاز بقدرتها على التعامل مع البيانات الخطية وغير الخطية عبر دوال النواة، مما يتيح فصلاً فعالاً في فضاءات أعلى أبعاداً. وتستخدم SVM على نطاق واسع في مجالات مثل تصنيف الصور والنصوص، المعلوماتية الحيوية، والمالية، بفضل قدرتها على معالجة الحدود المعقدة ومقاومة فرط التكيف، مع ضرورة الانتباه إلى ضبط المعاملات واختيار النواة المناسبة لتحقيق أفضل أداء (Azam et al., 2025).

## 4-4 تطبيق نماذج التعلم الآلي لتحليل وتقييم أداء المقطر الشمسي

### اعتماداً على النتائج التجريبية (تطبيق نماذج التعلم الآلي على البيانات التجريبية للمقطر الشمسي)

#### 1-4-4 المقطر الأول

المقطر الأول هو المقطر الشمسي التقليدي المستخدم في التجربة الأولى، وقد جُمعت بياناته التجريبية من خلال قياس المتغيرات الحرارية والمناخية المؤثرة على الأداء، مثل درجة حرارة الزجاج الداخلي والخارجي، ودرجة حرارة الماء، ودرجة حرارة الوسط المحيط، وسرعة الرياح، وشدة الإشعاع الشمسي، إضافةً إلى كمية المياه المنتجة. باستخدام هذه البيانات، تم إنشاء خريطة ارتباط (Correlation Map) توضح قوة واتجاه العلاقة بين المتغيرات الشكل 4-1، وذلك بهدف تحديد العوامل الأكثر تأثيراً على إنتاجية المقطر وتحليل الترابطات المحتملة بينها.



الشكل 4-1: خريطة الارتباط الخاصة بمعلمات أداء المقطر التقليدي للتجربة الأولى

أظهرت خريطة الارتباط الخاصة بالمقطر الشمسي التقليدي في التجربة الأولى وجود علاقة طردية قوية جداً بين درجة حرارة الزجاج الداخلي و الخارجي وإنتاجية المياه (0,89+) و (0,74+) على التوالي، ما يؤكد الدور المحوري لارتفاع درجة الحرارة في تعزيز عملية التبخير. كما لوحظت علاقة قوية جداً بين درجة حرارة الماء وكمية المياه المنتجة (0,90+) وهو ما يعكس التأثير المباشر لزيادة حرارة المياه على معدل التبخر. ودرجة أقل، بيّنت النتائج علاقة طردية متوسطة بين درجة حرارة الوسط المحيط والإنتاجية (0,63+). حيث تساهم حرارة البيئة في الحد من الفاقد الحراري. أما سرعة الرياح فقد أظهرت علاقة ضعيفة إلى متوسطة (0,42+) نتيجة تأثيرها المحدود على عملية التكثيف مقارنة بالعوامل الحرارية. في المقابل، جاء ارتباط شدة الإشعاع الشمسي ضعيفاً جداً (0,10+)، ويرجح أن يكون ذلك ناتجاً عن عدم تزامن القياسات مع باقي المتغيرات.

#### 1-1-4-4 تحليل نتائج التعلم الآلي للمقطر الأول

بعد تجهيز البيانات التجريبية للمقطر الأول وإدخالها في نماذج التعلم الآلي المختارة، تم تنفيذ عمليات التدريب والاختبار بهدف التنبؤ بإنتاجية المياه اعتماداً على المتغيرات المناخية والحرارية المسجلة. يوضح الجدول 4-1 قيم مؤشرات الأداء الإحصائية لكل نموذج، بما في ذلك معامل الارتباط (R)، ومتوسط الخطأ المطلق (MAE)، والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE)، ونسبة الخطأ المطلق (RAE)، ونسبة الجذر التربيعي للخطأ (RRSE)، وذلك لتقييم دقة النماذج ومقارنتها فيما بينها.

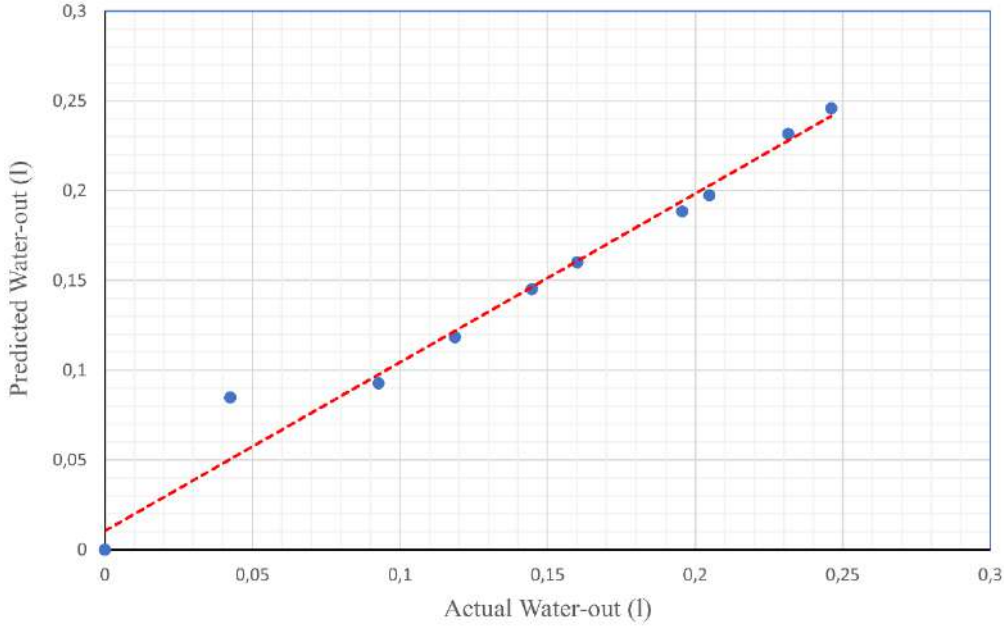
الجدول 4-1: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي

ملاحظات	RRSE (%)	RAE (%)	RMSE	MAE	R	النموذج (الخوارزمية)
أفضل نموذج - أعلى دقة وأقل خطأ	21.46	19.84	0.01926	0.01542	0.9757	دعم المتجهات Support Vector Machine
أداء جيد جداً وقريب من SVM	23.84	22.51	0.02139	0.01749	0.9672	الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP)
أداء مقبول لكنه أضعف بكثير من SVM و MLP	41.16	36.06	0.03694	0.02802	0.9145	الانحدار الخطي Linear Regression
أداء ضعيف نسبياً	52.59	52.34	0.04719	0.04067	0.8296	شجرة القرار Decision Tree
أضعف نموذج في هذه التجربة	64.99	65.41	0.05832	0.05084	0.7236	الغابة العشوائية Random Forest

أُجريت مقارنة بين خمسة نماذج تعلم آلي لتنبؤ إنتاجية المقطر الشمسي الشاهد باستخدام طريقة التحقق المتقاطع (10-fold cross-validation). أظهرت النتائج أن نموذج دعم المتجهات (SVM) حقق أفضل أداء، حيث سجل أعلى معامل ارتباط ( $R = 0.9757$ ) وأدنى قيم للخطأ المطلق المتوسط ( $MAE = 0.0154$  لتر) والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ ( $RMSE = 0.01926$  لتر)، مما يشير إلى دقة تنبؤ عالية وتوافق جيد بين القيم المتوقعة والفعلية. جاءت الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP) في المرتبة الثانية بنتائج قريبة من SVM تقدر ب ( $R = 0.9672$ )، مما يعكس قدرتها الجيدة على تمثيل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات المدخلة والإنتاجية، إلا أن أخطاءها كانت أعلى نسبياً. أما الانحدار الخطي فقد أظهر أداءً مقبولاً ( $R = 0.9145$ ) لكنه كان أقل دقة بسبب افتراضه العلاقة الخطية فقط بين المتغيرات. في المقابل، أظهرت كل من شجرة القرار والغابة العشوائية أداءً ضعيفاً نسبياً، حيث انخفض معامل الارتباط بشكل ملحوظ وارتفعت قيم الخطأ، وهو ما قد يعزى إلى محدودية حجم العينة وعدم كفاية بيانات التدريب لتوليد شجرة قرار فعالة أو نموذج غابة عشوائية قوي. بشكل عام، تُبرز هذه النتائج تفوق نموذج SVM في هذه التجربة وتؤكد على ملاءمته للتنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي في ظروف مماثلة.

#### Scatter plot منحني التشنت 2-1-4-4

يوضح الشكل 4-2 مدى توافق القيم المتوقعة مع القيم الفعلية للإنتاجية اليومية من الماء، باستخدام خوارزمية دعم المتجهات (Support Vector Regression) التي أثبتت تفوقها في النتائج:



الشكل 4-2: منحني التشنت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية دعم المتجهات SVM

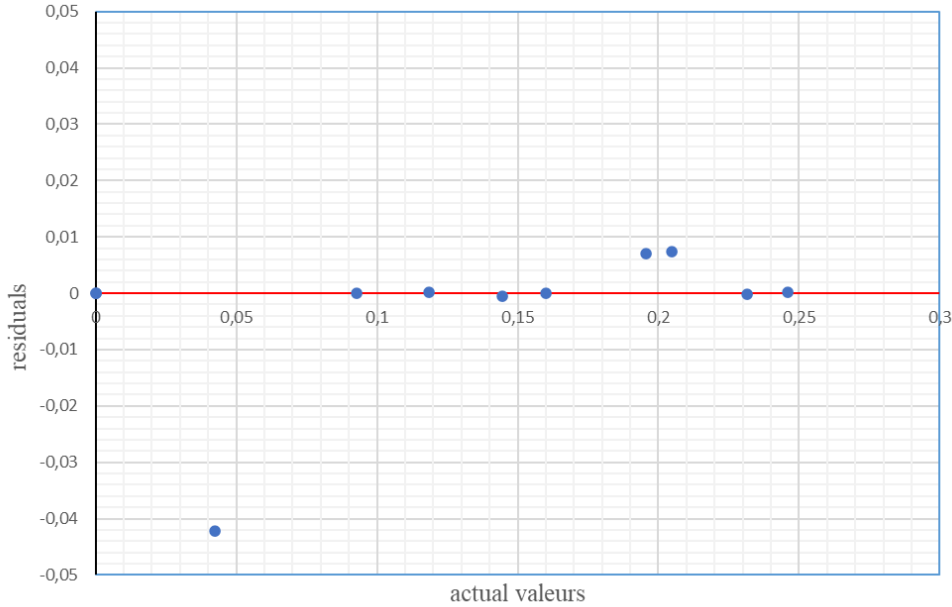
تحليل مخطط التشنت للمقطر الأول يبيّن أن القيم المتوقعة من النموذج تتبع بشكل عام القيم الفعلية لإنتاج الماء، مع وجود تطابق جيد في معظم نقاط البيانات. نلاحظ أن النقاط موزعة على خط قريب جداً من خط الانحدار المثالي خط  $45^\circ$  حيث (Actual = Predicted)، خاصة عند القيم المتوسطة والعالية للإنتاج (على سبيل المثال عند 0.2048 و 0.2315 لتر، تكون القيم المتوقعة 0.197418 و 0.231605 على التوالي). ومع ذلك، يمكن ملاحظة بعض التباين عند القيم المنخفضة جداً، حيث يظهر اختلاف طفيف بين القيمة الفعلية والمتوقعة عند 0.0425 لتر (القيمة المتوقعة كانت أعلى نسبياً: 0.0846 لتر)، وهو ما يشير إلى أن النموذج يميل إلى المبالغة قليلاً في التنبؤ عند بداية الإنتاج.

بشكل عام، يعكس هذا المخطط أن النموذج يمتلك قدرة جيدة على محاكاة العلاقة بين المدخلات والإنتاج الفعلي للمقطر الأول، مع معامل ارتباط مرتفع ودقة تنبؤ جيدة، خاصة عند القيم المتوسطة والعالية للإنتاج. الانحراف الطفيف عند القيم المنخفضة يمكن اعتباره مقبولاً في سياق البيانات التجريبية، نظراً لاحتمال وجود تأثير لعوامل خارجية مثل خطأ القياس أو بداية عملية التقطير. هذا يشير إلى أن النموذج مناسب

للاستخدام في التنبؤ بأداء المقطر ضمن الظروف التشغيلية المختلفة، مع إمكانية تحسين الأداء عند القيم المنخفضة عبر زيادة حجم العينة أو استخدام تقنيات معايرة إضافية.

### 3-1-4-4 مخطط التشتت المتبقي Residual scatter plot

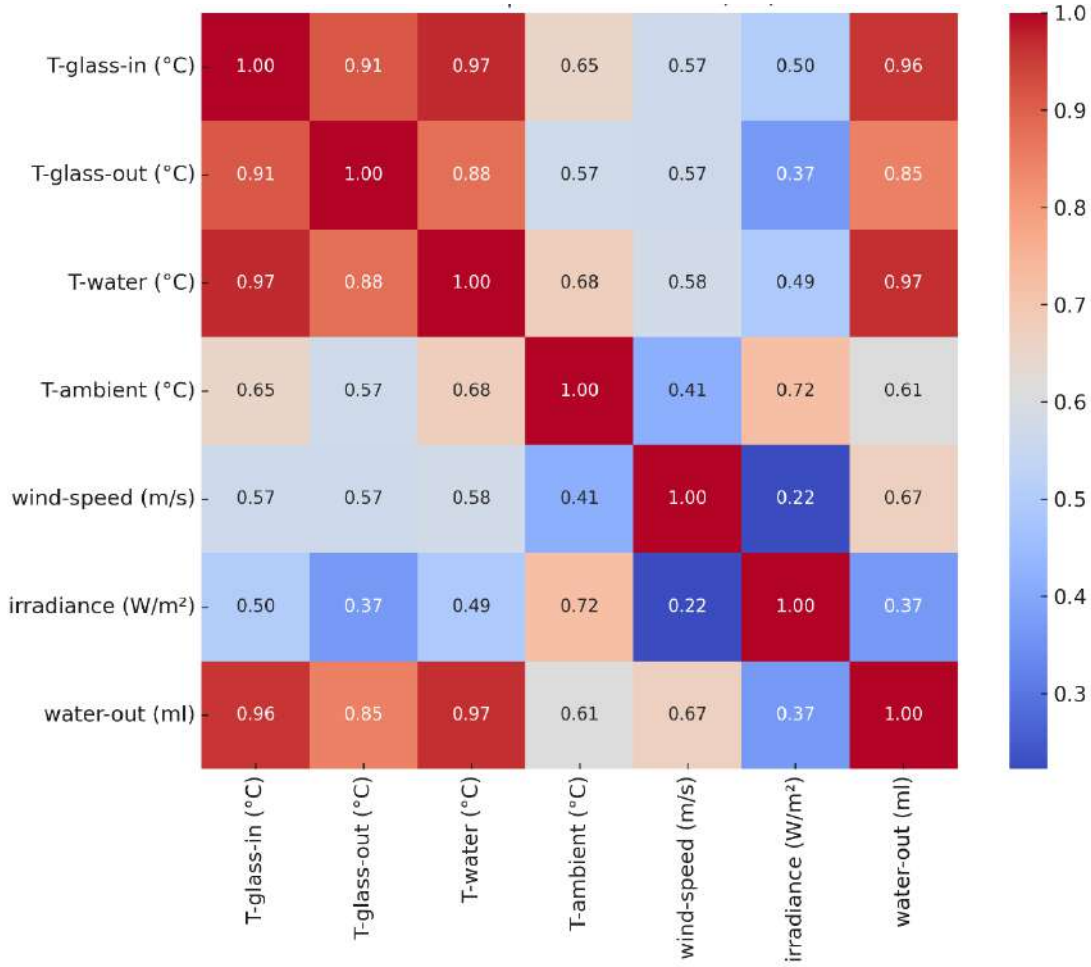
منحنى التشتت المتبقي للمقطر الأول الشكل 3-4 يبين أن معظم القيم المتبقية صغيرة جداً وقريبة من خط الصفر، مما يدل على دقة عالية للنموذج في تمثيل القيم الفعلية. يظهر انحراف سلبي واضح عند الإنتاج المنخفض (0.0425 ل/م<sup>2</sup>)، ما يشير إلى أن النموذج بالغ في التنبؤ عند هذه النقطة، بينما عند القيم المتوسطة والعالية للإنتاج تتوزع المتبقيات حول الصفر بانحرافات طفيفة أغلبها موجبة، وهو ما يعكس ميلاً طفيفاً للتقليل من القيم الفعلية في تلك المناطق. عدم وجود نمط محدد لتوزيع الأخطاء عبر كامل المجال يشير إلى أن النموذج خالٍ من الانحياز المنهجي وأن أخطائه عشوائية نسبياً، ما يؤكد موثوقيته ودقته في التنبؤ بأداء المقطر في معظم الحالات.



الشكل 4-3: منحنى التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي

### 1-4-4 المقطر الثاني

يعبر المقطر الثاني عن المقطر الشمسي المحسّن المستخدم في التجربة الأولى، حيث جرى إدخال تعديلات تصميمية وتقنية بهدف رفع كفاءته الإنتاجية مقارنة بالمقطر التقليدي كما وصفناه في الفصل السابق . من خلال البيانات التجريبية لهذا المقطر تم إنشاء خريطة ارتباط (Correlation Map) لبيان قوة واتجاه العلاقة بين المتغيرات المختلفة، وتحليل تأثير كل متغير على الأداء الكلي للمقطر الشكل 4-4.



الشكل 4-4: خريطة الارتباط الخاصة بمعلمات أداء المقطرمحسن للتجربة الأولى

تعكس خريطة الارتباط الخاصة ببيانات المقطر الشمسي الثاني (11 عينة) قوة وتأثير المتغيرات المناخية والحرارية على إنتاجية الماء؛ إذ يُظهر معامل الارتباط العالي بين درجة حرارة الماء داخل الحوض وكمية الماء المنتجة ( $R \approx 0.97$ ) أن هذا المتغير هو المحرك الرئيسي لعملية التبخير، يليه درجة حرارة الجانب الداخلي للزجاج ( $R \approx 0.96$ ) ودرجة حرارة الجانب الخارجي ( $R \approx 0.85$ )، ما يؤكد أهمية ضبط حرارة الأسطح الزجاجية لتعظيم الكفاءة. كما يُسجل سرعة الرياح ارتباطاً متوسطاً نسبياً ( $R \approx 0.67$ )، حيث تساهم حركة الهواء في تحسين التكتيف وفصل البخار، فيما تبين أن درجة الحرارة المحيطة لها أثر معتدل ( $R \approx 0.61$ ) من خلال تقليل الفاقد الحراري. بالمقابل، كان تأثير الإشعاع الشمسي ضعيفاً نسبياً ( $R \approx 0.37$ )، ربما لتداخله مع المتغيرات الحرارية الأخرى أو لعدم تزامن تسجيله مع تغيرات الحرارة. أما على مستوى العلاقات بين المتغيرات المستقلة، فقد سُجل ارتباط قوي بين T-water و T-glass-in، وهو أمر منطقي نظراً للتأثير المباشر للزجاج الداخلي على تسخين الماء داخل الحوض. كما لوحظ ارتباط جيد بين T-glass-in و irradiance، ما يعكس العلاقة المباشرة بين الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة السطح الداخلي للزجاج.

#### 1-1-4-4 تحليل نتائج التعلم الآلي للمقطر الثاني

أظهرت نتائج مقارنة النماذج الخمسة للمقطر المحسن في الجدول 4-2 تفوق نموذج دعم المتجهات (SVM)، حيث حقق أعلى معامل ارتباط ( $R = 0.9567$ ) وأدنى قيم لكل من  $MAE = 0.03089$  لتر و  $RMSE = 0.03530$  لتر، مما يدل على قدرة عالية على التنبؤ بإنتاجية المقطر مع أقل نسبة خطأ. تلاه نموذج شجرة القرار الذي أظهر أداءً جيدًا جدًا ( $R = 0.9449$ ) وقيم خطأ منخفضة نسبيًا، وهو ما يعكس كفاءته في تمثيل العلاقات المعقدة بين متغيرات الإدخال والإخراج. أما الانحدار الخطي فقد سجل أداءً متوسطًا ( $R = 0.9369$ ) مع قيم خطأ أعلى، مما يؤكد محدوديته في تمثيل السلوك غير الخطي للمقطر المحسن. في المقابل، أظهرت كل من الشبكة العصبية متعددة الطبقات والغابة العشوائية أداءً ضعيفًا نسبيًا، إذ انخفض معامل الارتباط بشكل ملحوظ وارتفعت قيم الخطأ، وهو ما قد يعزى إلى الحاجة إلى ضبط إضافي للمعاملات أو إلى عدم كفاية البيانات لتدريب هذه النماذج بكفاءة. تعزز هذه النتائج موثوقية نموذج SVM وتبرز دوره كأفضل خوارزمية للتنبؤ في حالة المقطر المحسن ضمن هذه التجربة.

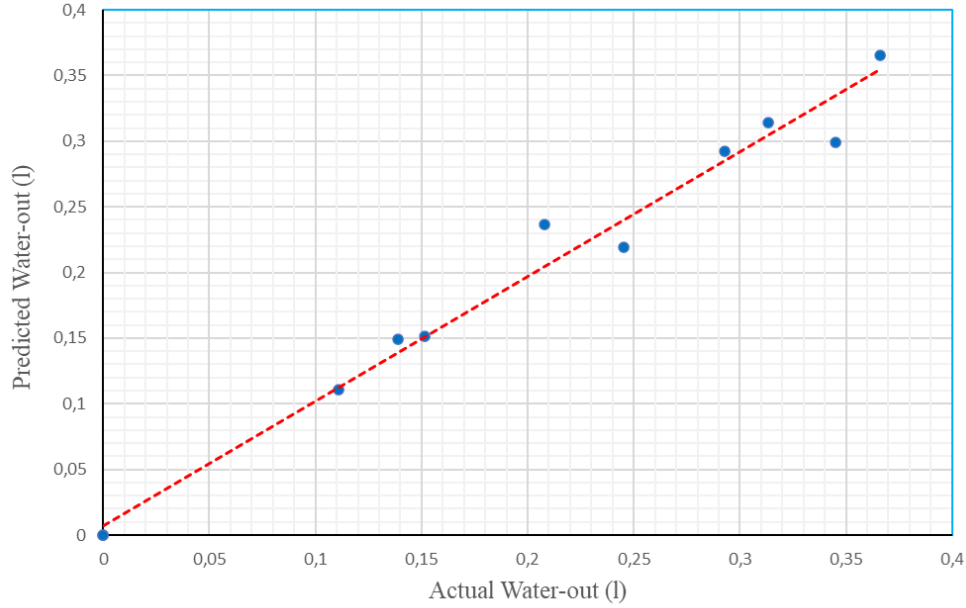
الجدول 4-2: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الثاني

ملاحظات	RRSE (%)	RAE (%)	RMSE	MAE	R	النموذج (الخوارزمية)
أفضل نموذج - أعلى دقة وأقل خطأ	27.83	27.92	0.03530	0.03089	0.9567	دعم المتجهات Support Vector Machine
أضعف نموذج في هذه التجربة	51.49	48.58	0.06532	0.05375	0.8436	الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP)
أداء متوسط	37.93	35.26	0.04811	0.03901	0.9369	الانحدار الخطي Linear Regression
أداء جيد جدًا وقريب من SVM	31.01	30.98	0.03933	0.03428	0.9449	شجرة القرار Decision Tree
أداء ضعيف نسبيًا	48.25	49.57	0.06121	0.05485	0.8581	الغابة العشوائية Random Forest

#### 1-1-4-4 منحنى التشتت Scatter plot

تحليل مخطط التشتت للمقطر الثاني الشكل 4-5 وضح أن القيم المتوقعة من نموذج دعم المتجهات تتبع بشكل عام القيم الفعلية لإنتاج الماء، لكن مع ملاحظة وجود انحرافات أكبر مقارنة بالمقطر الأول في بعض النقاط. نلاحظ أن العديد من النقاط قريبة من خط القيم المثالية (الخط الأحمر  $y=x$ )، خصوصًا عند القيم المنخفضة والمتوسطة مثل 0.2927 لتر و 0.3134 لتر حيث يكاد التطابق يكون تامًا (الفروقات أقل من 0.0001). ومع ذلك، عند بعض القيم مثل 0.2078 لتر و 0.2454 لتر تظهر انحرافات واضحة حيث تنبأ النموذج بقيم أعلى

أو أقل من الفعلية بشكل ملحوظ (0.2367 و0.2192 على التوالي)، وهو ما يشير إلى وجود قدر أكبر من التشتت في التنبؤات بالمقارنة مع القيم الفعلية.



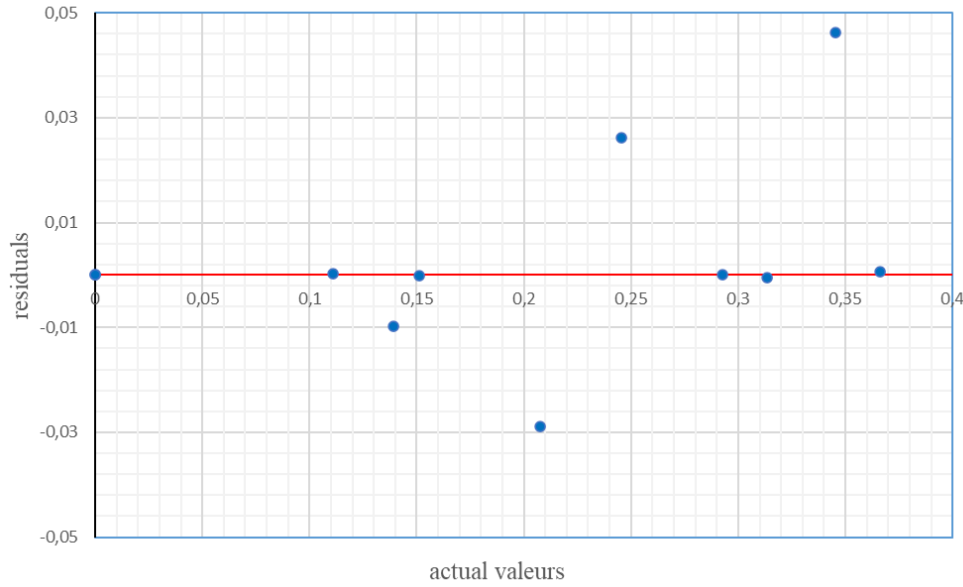
الشكل 4-5: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية دعم المتجهات SVM

كما نلاحظ أن النقطة عند 0.3452 لتر تُظهر انخفاضاً واضحاً في التنبؤ (القيمة المتوقعة 0.2990 لتر)، مما يدل على أن النموذج قد يكون قلل من تقدير كمية الإنتاج عند القيم المرتفعة نسبياً. ومع ذلك، النقاط الأخيرة مثل 0.366 لتر تظهر تنبؤاً دقيقاً جداً (0.3653 لتر).

بشكل عام، يعكس هذا المخطط أن النموذج يؤدي بشكل جيد في معظم نقاط البيانات، لكنه يعاني من بعض التذبذبات عند القيم المتوسطة والعالية للإنتاج، حيث يمكن أن يميل إما إلى المبالغة أو التقليل في التنبؤ. هذه الفروقات قد تعود إلى تباين ظروف التشغيل أو محدودية حجم العينة المسجلة في التجربة الأولى (والتي كانت تعتمد على القياس اليدوي)، ما أدى إلى تقليل دقة التنبؤ مقارنة بالمقطرات في التجربة الثانية التي استخدمت نظام تسجيل أوتوماتيكي (Arduino). ومع ذلك، يظل أداء النموذج مقبولاً ويُظهر ارتباطاً قوياً بين القيم الفعلية والمتوقعة.

#### 2-1-4-4 مخطط التشتت المتبقي Residual scatter plot

منحنى التشتت المتبقي للمقطر الثاني (الشكل 4-6) يُظهر أن القيم المتبقية موزعة على جانبي خط الصفر مع بعض الانحرافات الملحوظة. خاصة عند القيم المتوسطة والعالية للإنتاج. نلاحظ وجود خطأ سلبي نسبيًا عند 0.1391 و0.2078 ل/م<sup>2</sup>، ما يشير إلى أن النموذجبالغ في التنبؤ عند هذه النقاط، في حين يظهر انحراف إيجابي واضح عند 0.3452 و0.2454 ل/م<sup>2</sup> مما يعكس ميلًا طفيفًا للتقليل من القيم الفعلية عند هذه المستويات. رغم هذه الفروقات، تبقى معظم القيم قريبة من الصفر ولا تُظهر نمطًا منتظمًا، مما يدل على أن النموذج يتمتع بدقة جيدة وأن الأخطاء الملاحظة عشوائية نسبيًا، وهو ما يعزز موثوقيته في التنبؤ بأداء المقطر عبر مختلف مستويات الإنتاج.



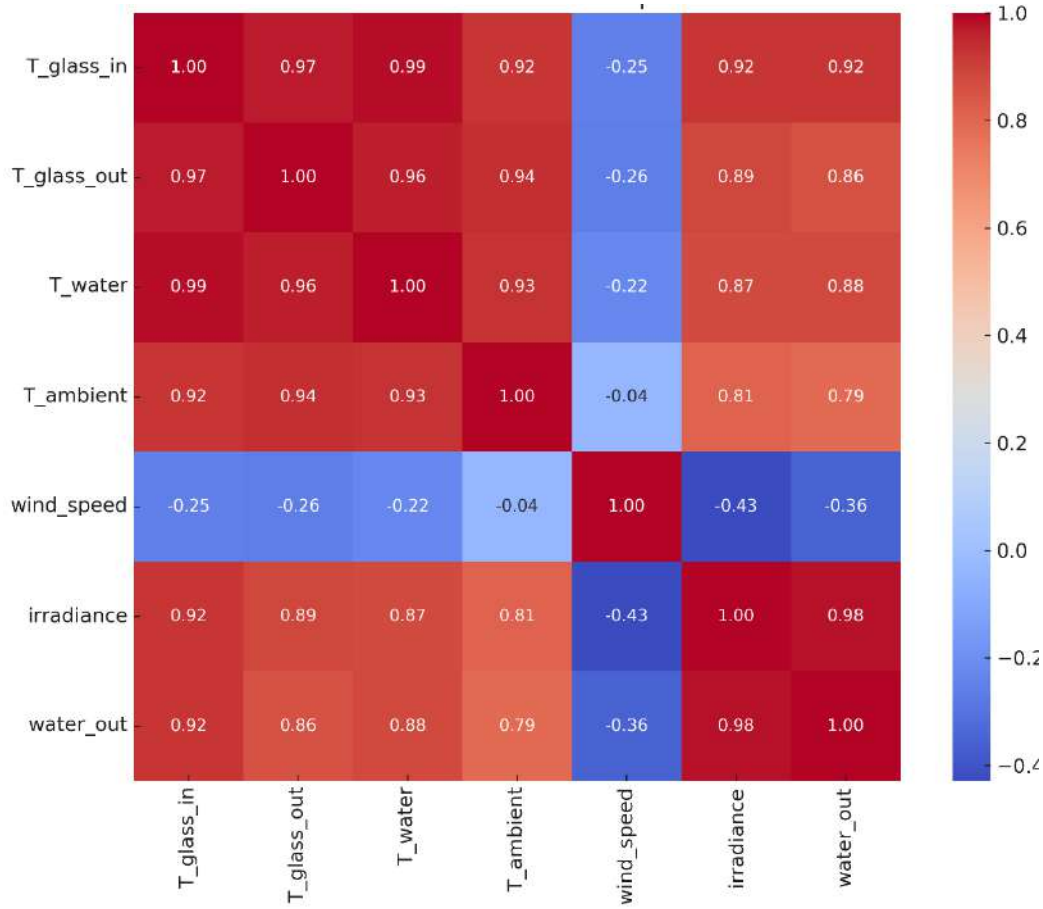
الشكل 4-6: منحنى التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الثاني

#### 2-4-4 المقطر الثالث

المقطر الثالث هو المقطر الشمسي التقليدي المستخدم في التجربة الثانية، والتي تم عرض تفاصيلها في الفصل الثالث. جُمعت البيانات التجريبية لمجموعة من المتغيرات الحرارية والمناخية باستخدام اليردوينو، وبالاعتماد على هذه البيانات، تم رسم خريطة ارتباط لبيان قوة واتجاه العلاقة بين المتغيرات المختلفة وتحليل تأثيرها على إنتاجية المقطر.

تعكس خريطة الارتباط العلاقة بين المتغيرات الحرارية والمناخية والكمية الناتجة من الماء المقطر (water\_out) في النظام المدرس (الشكل 4-7). يُلاحظ بوضوح أن أعلى ارتباط إيجابي مع كمية الماء الناتج كان مع شدة الإشعاع الشمسي، حيث بلغ معامل الارتباط حوالي 0.98، مما يشير إلى أن زيادة الإشعاع الشمسي تؤدي

مباشرة إلى زيادة كمية الماء المقطر. كما تُظهر الخريطة ارتباطًا إيجابيًا قويًا آخر بين درجات حرارة الزجاج الداخل والخارج وكمية الماء الناتج بمعامل ارتباط 0.92 و 0.86. من ناحية أخرى، هناك ارتباط إيجابي ملحوظ بين درجة حرارة الماء والماء الناتج، بمعامل يقارب 0.88، مما يعكس دور التسخين الفعال في تحسين أداء المقطر. أما درجة حرارة الهواء المحيط فقد أظهرت ارتباطًا متوسطًا بالماء الناتج بمعامل ارتباط يقدر بـ 0.79، مما يشير إلى تأثيره المحدود مقارنة بالإشعاع ودرجة حرارة الماء. في المقابل، كان ارتباط سرعة الرياح ضعيفًا نسبيًا مع كمية الماء الناتج، حيث لم تتجاوز القيمة -0.36، مما يدل على أن تأثير التهوية أو التبريد الخارجي ليس حاسمًا في الظروف التجريبية الحالية.



الشكل 4-7: خريطة ارتباط معاملات أداء المقطر التقليدي للتجربة الثانية

بشكل عام، تُظهر الخريطة أن أهم العوامل المؤثرة في كفاءة التقطير الشمسي هي الإشعاع الشمسي و درجات حرارة الزجاج وأيضا درجة حرارة الماء، في حين أن العوامل الجوية كدرجة حرارة الهواء وسرعة الرياح لها تأثير محدود نسبيًا.

### 1-2-4-4 تحليل نتائج التعلم الآلي للمقطر الثالث

أظهرت نتائج النماذج المطبقة على المقطر الشاهد في التجربة الثانية الموضحة في الجدول 3-4 تفوق نموذج الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP) بشكل واضح، حيث حقق أعلى معامل ارتباط ( $R = 0.9951$ ) وأدنى قيم لكل من MAE (لتر 0.0051) و RMSE (لتر 0.0083)، مما يشير إلى دقة عالية جداً في التنبؤ بالقيم الحقيقية لإنتاجية المقطر. وجاء نموذج شجرة القرار والغابة العشوائية في المرتبة الثانية والثالثة على التوالي، حيث أظهر أداءً ممتازاً بقيم خطأ منخفضة ومعامل ارتباط مرتفع جداً ( $R > 0.99$ )، ما يعكس قدرة عالية على تمثيل العلاقات المعقدة بين المدخلات والمخرجات. أما نموذج الانحدار الخطي فقد أظهر دقة جيدة ( $R = 0.9894$ )، لكنه كان أقل كفاءة مقارنة بالنماذج السابقة، وهو ما قد يرجع إلى محدوديته في تمثيل العلاقات غير الخطية. في المقابل، كان أداء نموذج دعم المتجهات هو الأضعف ضمن هذه التجربة رغم بقاء دقته مرتفعة نسبياً ( $R = 0.9871$ )، إلا أن قيم الخطأ كانت أعلى مقارنة ببقية النماذج، مما يبرز تفوق الشبكات العصبية ونماذج الأشجار في التنبؤ بأداء هذا المقطر الشاهد.

الجدول 3-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي الثالث

ملاحظات	RRSE (%)	RAE (%)	RMSE	MAE	R	النموذج (الخوارزمية)
أقل دقة مقارنة ببقية النماذج في هذا المقطر	16.33	11.04	0.0138	0.0080	0.9871	دعم المتجهات Support Vector Machine
أفضل نموذج - أعلى دقة وأقل خطأ	9.80	7.06	0.0083	0.0051	0.9951	الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP)
دقة جيدة لكن أقل من النماذج المعتمدة على الأشجار والشبكات	14.40	11.65	0.0122	0.0085	0.9894	الانحدار الخطي Linear Regression
أداء ممتاز وقريب جداً من MLP	12.14	8.25	0.0103	0.0060	0.9925	شجرة القرار Decision Tree
أداء ممتاز أيضاً	13.04	8.38	0.0110	0.0061	0.9916	الغابة العشوائية Random Forest

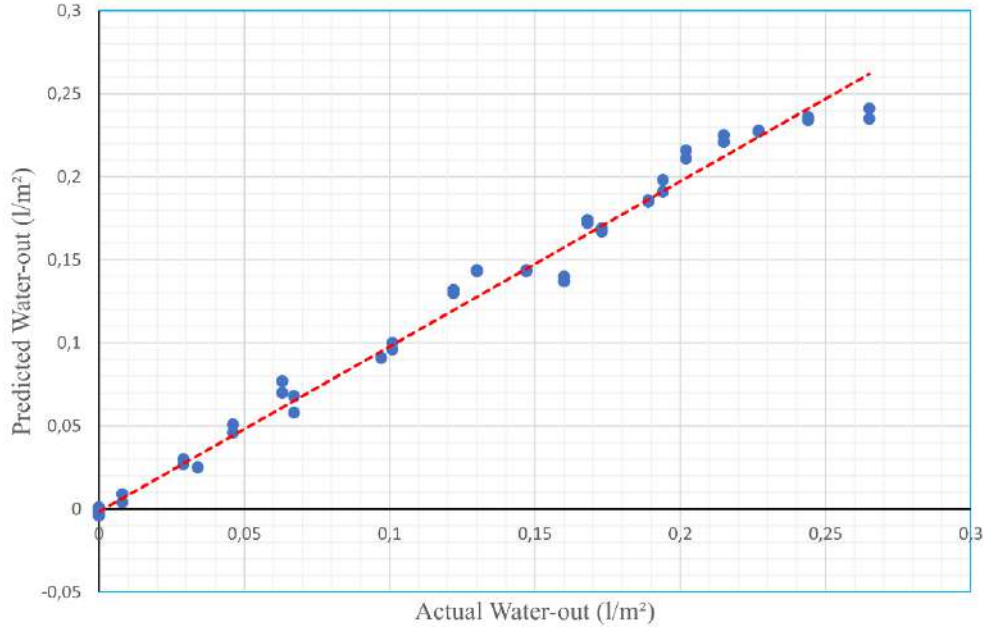
### 2-2-4-4 منحنى التشتت Scatter plot

تحليل منحنى التشتت باستخدام خوارزمية الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP) للمقطر الثالث يوضح بدقة مدى جودة أداء النموذج في التنبؤ بـ إنتاج الماء (الشكل 4-8). نلاحظ أن النقاط الزرقاء الممثلة للقيم المتوقعة (Predicted) مقابل القيم الفعلية (Actual) تتوزع بشكل متقارب جداً حول خط الانحدار المثالي (الخط الأحمر)، وهو ما يشير إلى وجود توافق قوي بين القيمتين.

في القيم القريبة من الصفر، يظهر أن النموذج يميل إلى إنتاج قيم سالبة طفيفة (من -0.001 إلى -0.004)، لكنهما صغيرة جدًا وغير مؤثرة عمليًا، ما يدل على أن النموذج يحافظ على استقراره في حالات الإنتاج المنخفض ولا يولد انحرافات كبيرة. ابتداءً من القيم المتوسطة (0.05 – 0.20 لتر/م<sup>2</sup>) تتقارب القيم المتوقعة مع الفعلية بشكل واضح مع اختلافات طفيفة جدًا ( $\pm 0.005$  تقريبًا)، ما يدل على أن النموذج يتابع اتجاه البيانات بشكل دقيق ويستطيع تمثيل العلاقة الفعلية بين المدخلات والمخرجات بكفاءة.

أما عند القيم الأعلى (أكثر من 0.20 لتر/م<sup>2</sup>)، فهناك بعض النقاط التي تقع تحت أو فوق خط الانحدار، مثل القيم عند 0.265 لتر/م<sup>2</sup> حيث نجد أن النموذج قد قلل التنبؤ قليلاً في إحدى النقاط (0.241 مقابل 0.265) وبالعكس قليلاً في نقطة أخرى (0.235 مقابل 0.265). ورغم ذلك تبقى هذه الفروقات محدودة، وهو ما يتضح من كون معظم النقاط لا تبتعد كثيرًا عن الخط الأحمر.

بالمجمل، يثبت هذا المنحنى أن النموذج في المقطر الثالث يتمتع بدقة عالية جدًا، مع معامل ارتباط قوي (R) قريب من 1 (وانحرافات محدودة ومنظمة حول خط الانحدار). هذا يتماشى مع كون تجربة المقطر الثالث تمت باستخدام نظام تسجيل أوتوماتيكي (Arduino)، مما سمح بالحصول على عدد كبير من القراءات الدقيقة والمتواصلة، وبالتالي تحسين تدريب النموذج وتقليل التشتت.

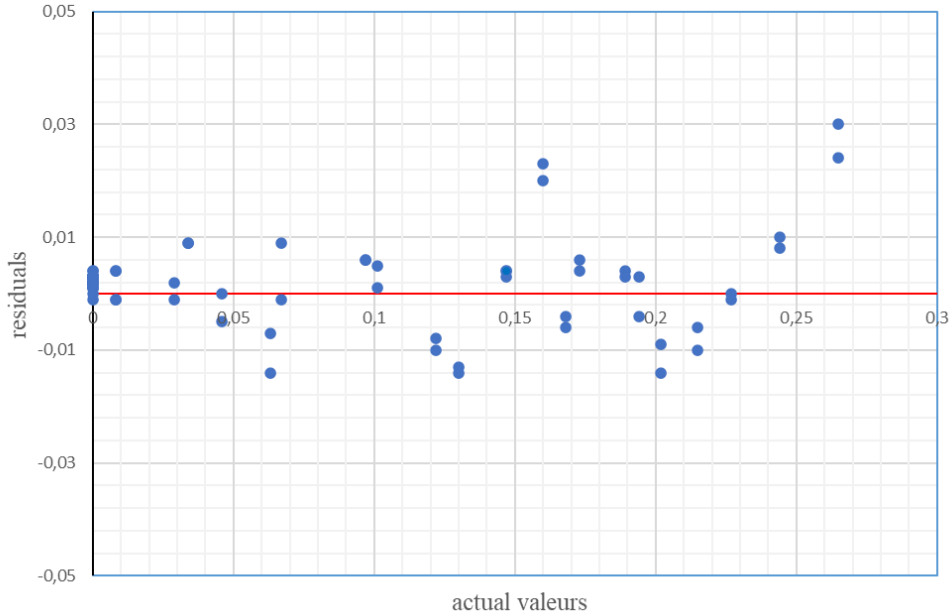


الشكل 4-8: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية الشبكة العصبية متعدد

الطبقات (MLP)

### 3-2-4-4 مخطط التشتت المتبقي Residual scatter plot

منحنى التشتت المتبقي للمقطر الثالث (الشكل 4-9) يُظهر تباينًا ملحوظًا في القيم المتبقية، حيث تتركز غالبية القيم حول الصفر مع وجود بعض الانحرافات الإيجابية والسلبية عند نقاط محددة. عند القيم المنخفضة للإنتاج (قريبة من الصفر)، نجد بقايا موجبة صغيرة نسبيًا تدل على ميل النموذج للتقليل الطفيف من القيم الفعلية. ومع ارتفاع القيم الفعلية، تبدأ بعض الانحرافات السالبة في الظهور، مثل عند 0.122 و0.215 و0.13 و0.063، مما يشير إلى أن النموذج بالغ في التنبؤ عند هذه النقاط. في المقابل، عند قيم مثل 0.265 و0.16 نجد بقايا موجبة أكبر نسبيًا، ما يدل على تقليل النموذج من التنبؤ مقارنة بالقيم الحقيقية. رغم هذا التذبذب، يبقى توزيع البقايا عشوائيًا نسبيًا ولا يتبع نمطًا خطيًا واضحًا، ما يدل على أن النموذج يلتقط العلاقة بين المتغيرات بشكل جيد وأن الأخطاء المتبقية موزعة بشكل متوازن نسبيًا حول الصفر، وهو مؤشر إيجابي على موثوقية النموذج في التنبؤ بأداء المقطر.

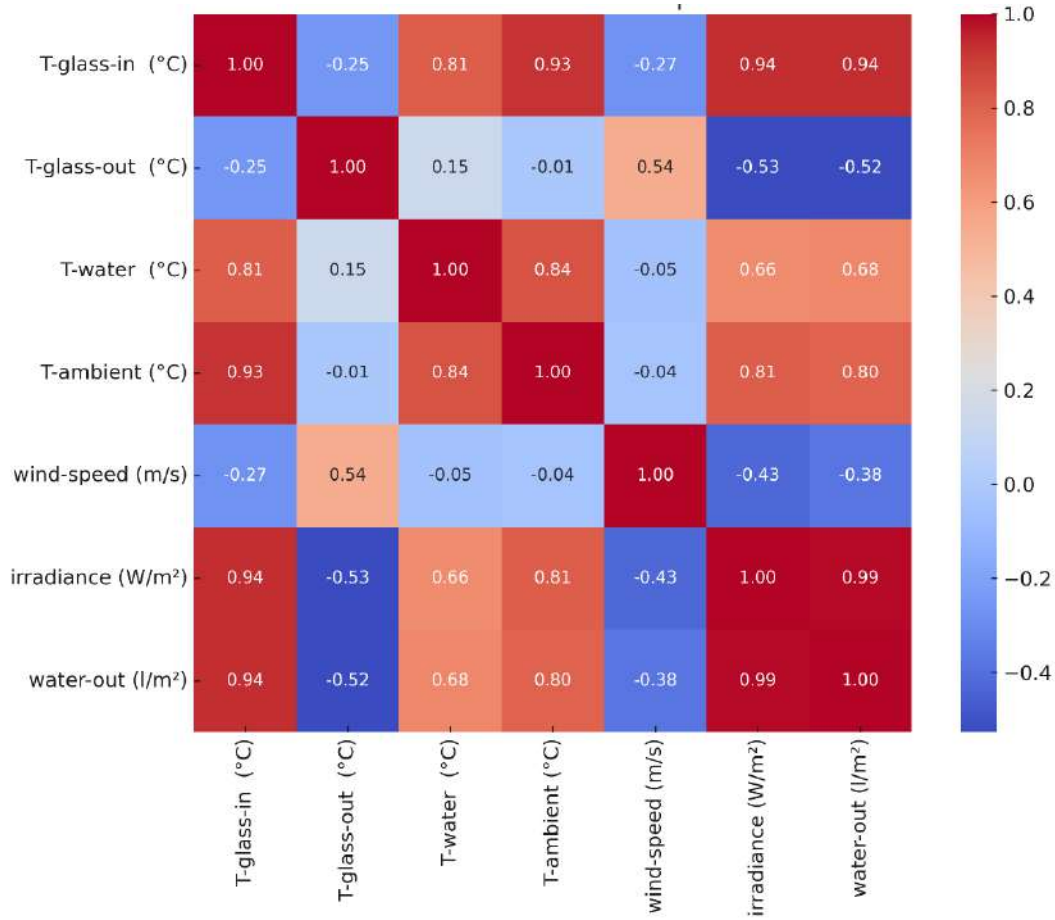


الشكل 4-9: منحنى التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الثالث

### 3-4-4 المقطر الرابع

يمثل المقطر الرابع المقطر المحسن الأول في التجربة الثانية، حيث دُعِم بمبادل حراري يمرّ عبره الماء الجوفي. ولتقييم أداء هذا النظام، قمنا برسم خريطة الارتباط بين مختلف متغيرات التجربة (الشكل 4-10)، والتي أظهرت أن إنتاجية المقطر الشمسي (كمية الماء المقطر) ترتبط بقوة موجبة عالية جدًا مع شدة الإشعاع الشمسي ( $r=0.99$ ) ومع درجة حرارة الزجاج الداخلي ( $r=0.94$ )، ما يؤكد أن الإشعاع هو العامل الرئيس المحرك للعملية وأن تسخين الغلاف الداخلي للزجاج يعزز عملية التبخر والتكثيف. كما يظهر ارتباط قوي موجب بين

كمية الماء ودرجة حرارة الماء ( $r=0.68$ ) ودرجة حرارة الوسط المحيط ( $r=0.80$ ) ، مما يعكس التأثير التراكمي للظروف الحرارية المحيطة في رفع كفاءة المقطر. في المقابل، درجة حرارة الزجاج الخارجي أظهرت ارتباطاً سالباً متوسطاً مع كل من الإشعاع ( $r=-0.53$ ) وإنتاجية الماء ( $r=-0.52$ ) ، وهو ما يمكن تفسيره بزيادة فقدان الحرارة من السطح الخارجي عند ارتفاع درجة حرارته، مما يقلل من فرق درجة الحرارة اللازم للتكثيف. من جهة أخرى، لم يكن لسرعة الرياح تأثير واضح، حيث ارتبطت سلباً وبدرجة ضعيفة مع إنتاجية الماء ( $r=-0.38$ ) ومعظم المتغيرات الحرارية، مما يشير إلى أن تأثير التبريد بالحمل الخارجي محدود مقارنة بتأثير الإشعاع والظروف الحرارية الداخلية. إجمالاً، توضح هذه الخريطة أن الأداء الحراري للمقطر يخضع بدرجة أساسية لتأثير الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة العناصر الداخلية، بينما العوامل الخارجية مثل سرعة الرياح ودرجة حرارة الزجاج الخارجي تمارس تأثيراً ثانوياً أو سلبياً على الكفاءة .



الشكل 4-10: خريطة ارتباط لمعلومات أداء المقطر المحسن الأول في التجربة الثانية

### 1-3-4-4 تحليل نتائج التعلم الآلي للمقطر الرابع

تم استعمال نفس نماذج التعلم الآلي وتحصلنا على الجدول 4-4:

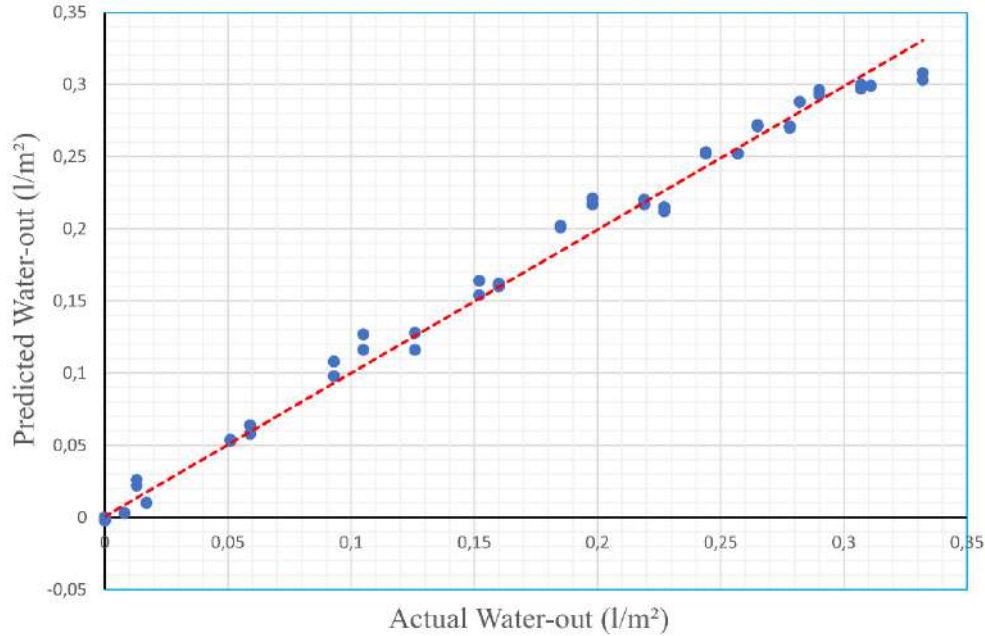
الجدول 4-4: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي

ملاحظات	RRSE (%)	RAE (%)	RMSE	MAE	R	النموذج (الخوارزمية)
أداء جيد جدًا	10.70	7.39	0.0125	0.0077	0.9942	دعم المتجهات Vector Machine
أداء ممتاز	9.39	7.53	0.0110	0.0078	0.9955	الشبكة العصبية متعدد الطبقات (MLP)
أداء ممتاز لكن أقل دقة من M5P	9.67	7.85	0.0113	0.0081	0.9952	الانحدار الخطي Linear Regression
أفضل نموذج – أعلى دقة و أقل خطأ	8.13	5.67	0.0095	0.0059	0.9966	شجرة القرار Decision Tree
قريب جدًا من M5P لكن أقل دقة قليلاً	9.49	5.65	0.0111	0.0059	0.9954	الغابة العشوائية Random Forest

بينت نتائج النماذج المطبقة على المقطر المحسن الأول في التجربة الثانية تفوق نموذج شجرة القرار بشكل واضح، حيث حقق أعلى معامل ارتباط ( $R = 0.9966$ ) وأدنى قيم لكل من ( $0.0059$  لتر) MAE و ( $0.0095$  لتر) RMSE، مما يعكس قدرة عالية جدًا على تمثيل العلاقة بين المتغيرات المدخلة والإنتاجية الفعلية. وجاء نموذج الغابة العشوائية في المرتبة الثانية بأداء مقارب للغاية لشجرة القرار من حيث قيم الخطأ ومعامل الارتباط، ما يبرز فعالية النماذج المعتمدة على الأشجار في هذه التجربة. أما الشبكة العصبية متعددة الطبقات والانحدار الخطي فقد أظهر أداءً ممتازًا كذلك ( $R \approx 0.995$ )، لكن بدقة أقل نسبيًا مقارنة بشجرة القرار والغابة العشوائية، مما يشير إلى أن العلاقة بين المتغيرات قد تكون شبه غير خطية مما استفادت منه نماذج الأشجار بشكل أكبر. من جهة أخرى، أظهر نموذج دعم المتجهات أداءً جيدًا جدًا، لكنه بقي أقل دقة مقارنة ببقية النماذج المتقدمة، وهو ما يعزز استنتاج أن خوارزميات الأشجار كانت الأكثر فعالية في التنبؤ بأداء هذا المقطر المحسن.

#### 2-3-4-4 منحى التشتت

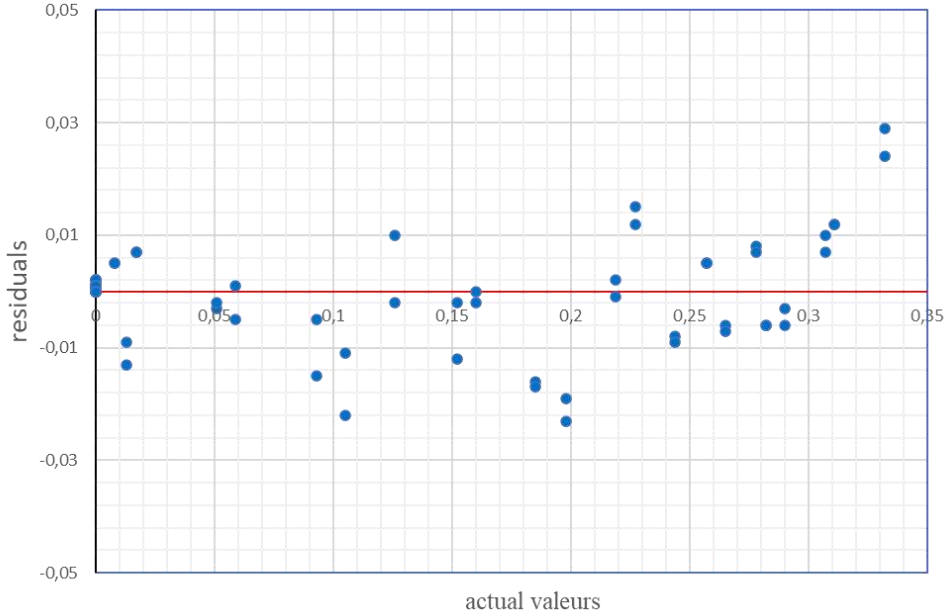
يُظهر منحى التشتت للمقطر الرابع (الشكل 4-11) دقة عالية للنموذج شجرة القرار DT، حيث تبقى معظم النقاط قريبة جدًا من خط المثالية مع غياب نقاط شاذة بعيدة، ما يعكس قوة معامل الارتباط. عند القيم المنخفضة جدًا للإنتاج، يعطي النموذج قيمًا سالبة طفيفة (بين -0.001 و -0.002)، وهي غير مؤثرة عمليًا وتشير فقط إلى انحياز طفيف عند غياب الإنتاج. في مرحلة الإنتاج المنخفض والمتوسط (0.008 – 0.26 ل/م<sup>2</sup>) يحافظ النموذج على تطابق ممتاز مع القيم الفعلية بفروقات صغيرة جدًا، مما يؤكد قدرته على تمثيل بداية عملية الإنتاج بدقة. أما عند القيم المرتفعة (أكثر من 0.29 ل/م<sup>2</sup>) فيظهر ميل بسيط نحو التقليل من القيم الفعلية بفارق لا يتجاوز 0.03، ومع ذلك يبقى الاتجاه العام محافظًا على الخطية الجيدة. بشكل عام، يعكس التوزيع المنتظم للنقاط حول خط الانحدار أداءً ممتازًا للنموذج ودقة عالية في التنبؤ بإنتاجية المقطر في مختلف مستويات الإنتاج.



الشكل 4-11: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والمتوقعة باستخدام خوارزمية شجرة القرار DT

### 3-3-4-4 مخطط التشتت المتبقي Residual scatter plot

منحنى التشتت المتبقي للمقطر الرابع (الشكل 4-12) يُظهر نمطاً أكثر انتظاماً في القيم المنخفضة، حيث تتركز معظم البقايا حول الصفر مع انحرافات صغيرة جداً (بين 0 و 0.002) تدل على أن النموذج يحقق تطابقاً جيداً مع القيم الفعلية في بداية النطاق. عند ارتفاع القيم الفعلية، تبدأ بعض الانحرافات السالبة والموجبة في الظهور بشكل متناوب، مثل الانحرافات الموجبة عند 0.126 و 0.311 و 0.332، والتي تشير إلى أن النموذج كان أقل من القيم الفعلية في تلك النقاط، بينما نلاحظ انحرافات سالبة واضحة عند 0.093 و 0.185 و 0.198 و 0.105 مما يدل على أن النموذج بالغ في تقدير القيم عند هذه النقاط. ورغم وجود هذه الانحرافات، يبقى توزيع البقايا متوازناً نسبياً بين القيم الموجبة والسالبة، مما يشير إلى عدم وجود تحيز واضح في النموذج. هذا النمط يوحي بأن أداء النموذج جيد بشكل عام، مع قدرة مقبولة على تمثيل العلاقة بين المتغيرات، وإن كانت بعض القيم المتطرفة تحتاج إلى تحسين لتقليل الخطأ.

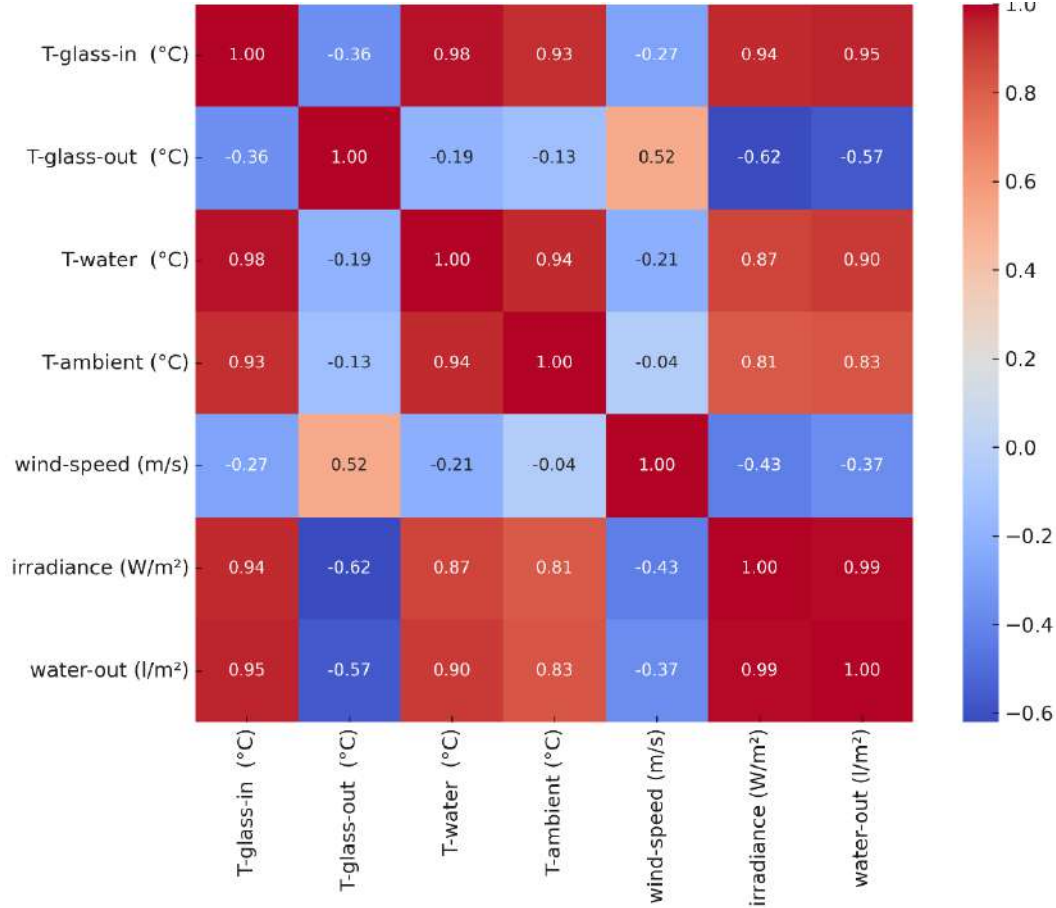


الشكل 4-12: منحنى التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الرابع

### 4-4-4 المقطر الخامس

المقطر الخامس ألا وهو المقطر المحسن الثاني في التجربة الثانية المزود بنظام تبريد، قمنا بنفس العملية دراسة ترابط المتغيرات وتحصلنا على خريطة الارتباط (الشكل 4-13) اين تُظهر أن إنتاجية المقطر الشمسي تتأثر بشكل أساسي بالعوامل الحرارية الداخلية، حيث سُجّل ارتباط موجب قوي جداً مع شدة الإشعاع الشمسي ( $r \approx 0.99$ ) ودرجة حرارة الماء ( $r \approx 0.90$ )، مما يؤكد أن ارتفاع الطاقة الحرارية المتاحة يعزز عملية التبخر وبالتالي زيادة الإنتاجية. كما وُجد ارتباط موجب مرتفع مع درجة حرارة السطح الداخلي للزجاج ( $r \approx 0.95$ )، وهو ما يعكس انتقال الحرارة عبر الغطاء الزجاجي ودوره في رفع كفاءة النظام وأيضاً سجل درجة

الحرارة المحيطة ارتباط جيد ( $r \approx 0,83$ ) . في المقابل، لوحظ ارتباط ضعيف وسالب مع كل من ودرجة حرارة السطح الخارجي ( $r \approx -0,57$ ) وسرعة الرياح ( $r \approx -0,28$ ) ، ما يشير إلى أن العوامل البيئية الخارجية قد تسهم في فقدان الحرارة من سطح المقطر وتقليل الكفاءة الكلية. وبصورة عامة، تؤكد النتائج أن الأداء الأمثل للمقطر يعتمد بالدرجة الأولى على تحسين امتصاص الإشعاع الشمسي والاحتفاظ بالحرارة الداخلية، في حين يلعب التحكم في الظروف الخارجية دورًا ثانويًا.



الشكل 4-13: خريطة ارتباط لمعلومات أداء المقطر المحسن الثاني في التجربة الثانية

#### 1-4-4-4 تحليل نتائج التعلم الآلي للمقطر الخامس

أظهرت نتائج النماذج المطبقة على المقطر المحسن الثاني في التجربة الثانية الموضحة في الجدول 4-5 تفوق نموذج الغابة العشوائية بشكل ملحوظ، حيث حقق أعلى معامل ارتباط ( $R = 0.9967$ ) وأدنى قيم لكل من MAE (0.0041 لتر) و RMSE (0.0071 لتر)، ما يشير إلى دقة استثنائية وقدرة تنبؤية عالية جدًا. وجاءت الشبكة العصبية متعددة الطبقات في المرتبة الثانية بأداء قوي للغاية ( $R = 0.9951$ ) وقيم أخطاء منخفضة جدًا، مما يدل على قدرتها على تمثيل العلاقات المعقدة بين المتغيرات بدقة عالية. في حين أظهر نموذج شجرة القرار دقة جيدة جدًا وقريبة من أداء MLP لكنه كان أقل قليلاً من حيث القيم التنبؤية المثلى. أما الانحدار الخطي ونموذج دعم المتجهات فقد قدما أداءً ممتازاً ( $R \approx 0.99$ ) ، إلا أن دقتهما كانت أقل نسبيًا مقارنة بالنماذج

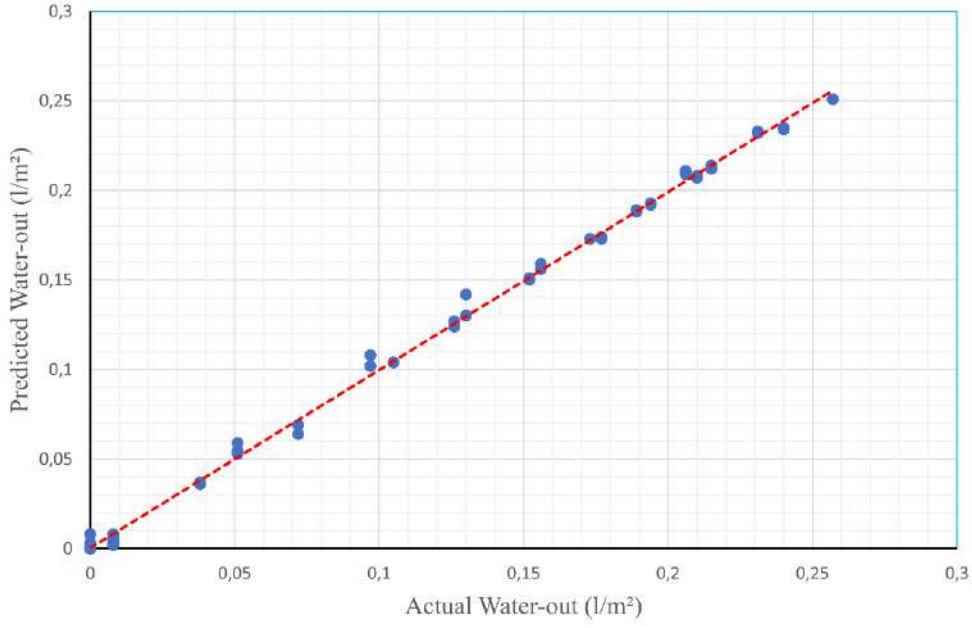
السابقة، ما يؤكد أن نماذج التعلم القائمة على الأشجار والشبكات العصبية كانت الأنسب للتنبؤ بإنتاجية هذا المقطر المحسن.

الجدول 4-5: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي المختلفة في التنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي

ملاحظات	RRSE (%)	RAE (%)	RMSE	MAE	R	النموذج (الخوارزمية)
أقل دقة من MLP و Random Forest	13.82	9.13	0.0121	0.0071	0.9910	دعم المتجهات Support Vector Machine
دقة عالية وأخطاء منخفضة	9.84	7.39	0.0086	0.0057	0.9951	الشبكة العصبية متعدد الطبقات (MLP)
أداء ممتاز لكن أقل من النماذج الأخرى	12.37	9.91	0.0108	0.0077	0.9921	الانحدار الخطي Linear Regression
أداء جيد جداً	10.92	6.94	0.0095	0.0054	0.9939	شجرة القرار Decision Tree
أفضل نموذج – أعلى دقة وأقل خطأ	8.17	5.30	0.0071	0.0041	0.9967	الغابة العشوائية Random Forest

#### 2-4-4-4 منحى التشتت

يُظهر منحى التشتت الخاص بالمقطر الخامس (الشكل 4-14) دقة تنبؤية عالية جداً لنموذج الغابة العشوائية RF، حيث تتوزع غالبية النقاط بمحاذاة خط المثالية مع انحرافات طفيفة فقط عند بعض القيم. في القيم المنخفضة جداً للإنتاج، سجل النموذج بعض القيم الموجبة الصغيرة رغم غياب الإنتاج الفعلي (0.002 - 0.008 م<sup>2</sup>/ل)، وهو ما يعكس انحيازاً ضئيلاً عند الصفر، لكنه غير مؤثر عملياً. ابتداءً من مرحلة الإنتاج الحقيقي (أكثر من 0.038 م<sup>2</sup>/ل)، يظهر النموذج قدرة ممتازة على تمثيل القيم الفعلية بدقة، مع تقارب كبير بين القيم المتوقعة والواقعية حتى عند القيم المرتفعة (أكثر من 0.20 م<sup>2</sup>/ل). لوحظت فروقات بسيطة جداً عند بعض النقاط المتطرفة، حيث يميل النموذج أحياناً إلى التقليل أو الزيادة الطفيفة، لكنها لا تؤثر على الاتجاه العام الذي يظل خطياً ومتسقاً. يشير هذا السلوك إلى أن النموذج قادر على التنبؤ بكفاءة عالية بجميع مستويات إنتاجية المقطر، مع احتفاظه باستقرار جيد في التنبؤ حتى عند تغير ظروف التشغيل.

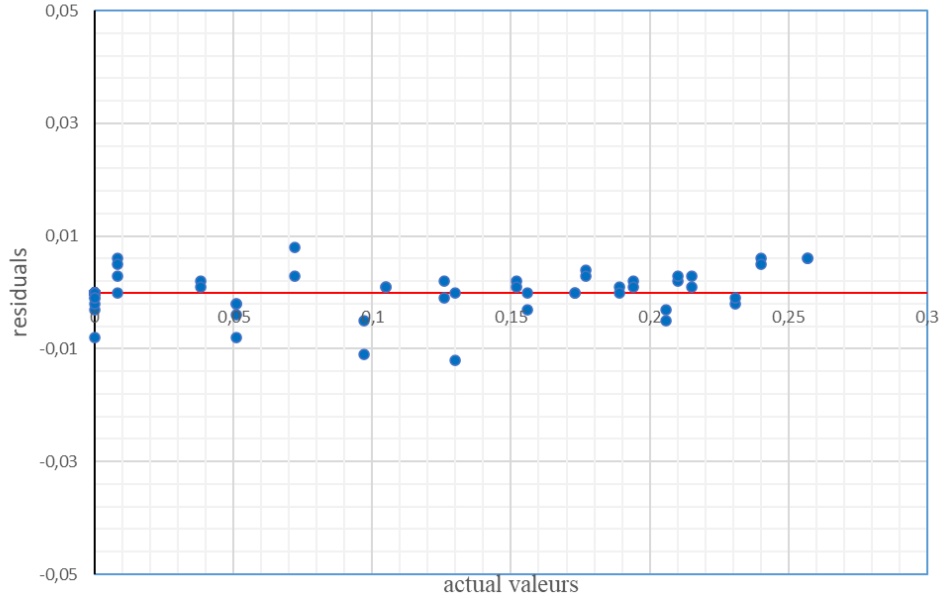


الشكل 4-14: مخطط التشتت يوضح القيم الفعلية والماتوقعة باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية RF

#### 3-4-4-4 مخطط التشتت المتبقي Residual scatter plot

منحنى التشتت المتبقي للمقطر الخامس (الشكل 4-15) يُظهر أن معظم القيم المتبقية قريبة جداً من الصفر، ما يدل على توافق جيد بين القيم المتوقعة والفعلية في غالبية نقاط القياس. في بداية النطاق، تظهر بعض الانحرافات السالبة الطفيفة عند القيم المنخفضة (مثل -0.008 و-0.003)، ما يشير إلى أن النموذج قام بتقديرات أعلى قليلاً من القيم الفعلية عند بداية التجربة. مع زيادة القيم الفعلية، تتناوب البقايا بين موجبة وسالبة لكنها تبقى صغيرة جداً (بين -0.005 و+0.008)، وهو ما يدل على غياب تحيز واضح للنموذج نحو المبالغة أو النقصان في التنبؤ. عند القيم المتوسطة، نلاحظ بعض التصحيحات الصغيرة الإيجابية التي توجي بأن النموذج كان أقل قليلاً من القيم الحقيقية، لكنه عاد إلى التوافق الجيد عند القيم المرتفعة حيث اقتربت البقايا من الصفر بشكل ملحوظ. هذا التوزيع المتوازن للبقايا حول الصفر يدل على دقة النموذج واستقراره، مع أخطاء

طفيفة غير مؤثرة على جودة التنبؤ الإجمالية، مما يجعله مناسبًا للتنبؤ بكميات الإنتاج في هذا النوع من المقطرات.



الشكل 4-15: منحنى التشتت المتبقي من ناتج التقطير من المقطر الشمسي الخامس

## 5-4 مقارنة بين المقطرات الخمسة

يوضح الجدول 4-6 أن النموذج الأفضل يختلف باختلاف نوع المقطر وظروف تشغيله. في التجربة الأولى، التي شملت مقطرًا شاهدًا ومقطرًا محسنًا بإضافة لوحة معدنية، حقق نموذج دعم المتجهات (SVM) أفضل أداء في كلا المقطرين، حيث سجل معامل ارتباط مرتفع ( $R=0.9757$  و  $R=0.9567$  على التوالي) مع قيم منخفضة نسبيًا لـ MAE و RMSE، مما يعكس دقة جيدة في التنبؤ بإنتاجية المقطرات. ومع ذلك، فإن القيم المرتفعة نسبيًا لـ MAE و RMSE تشير إلى أن البيانات في التجربة الأولى تتسم بتباين أكبر وصعوبة أعلى في النمذجة مقارنة بالتجربة الثانية. ومن المهم الإشارة إلى أن عملية القياس في التجربة الأولى تمت يدويًا، مما أدى إلى تسجيل عدد محدود من النقاط التجريبية وبالتالي قلة من حجم البيانات المتاحة للتدريب، وهو ما قد يفسر تقلب القيم وارتفاع نسبة الخطأ.

أما في التجربة الثانية، التي شملت مقطرًا شاهدًا ومقطرين محسنين (مبادل حراري وتبريد للزجاج)، فقد لوحظ تحسن كبير في أداء النماذج بشكل عام. إذ تفوقت النماذج المعتمدة على الشبكات العصبية (MLP) وأشجار القرار (M5P) والغابة العشوائية (RF) على نموذج SVM بشكل واضح، حيث سجلت جميعها معاملات ارتباط مرتفعة جدًا ( $R > 0.995$ ) مع انخفاض ملحوظ في قيم MAE و RMSE (أقل من 0.01)، مما يدل على دقة تنبؤ عالية جدًا وقابلية أفضل لالتقاط العلاقة بين المتغيرات. ويُعزى جزء من هذا التحسن إلى كون القياسات في التجربة الثانية قد تمت باستخدام نظام آلي يعتمد على الأردوينو، مما مكّن من جمع عدد أكبر بكثير من

البيانات التجريبية وبزمن أخذ عينات منتظم، وهو ما ساعد النماذج على التعلم بشكل أفضل وتقليل الخطأ. على وجه الخصوص، كان أداء الغابة العشوائية (RF) في المقطر الخامس هو الأفضل على الإطلاق، مسجلاً أقل قيمة لمؤشري MAE (0.0041 لتر) و RMSE (0.0071 لتر)، مما يعكس قدرة عالية على تعميم النموذج وتقليل الخطأ.

الجدول 4-6: مقارنة بين النماذج الأحسن للمقطرات الخمس

المقتر	النموذج (الخوارزمية)	R	MAE	RMSE	RAE (%)	RRSE (%)
المقتر 1 (شاهد – تجربة 1)	دعم المتجهات Vector Machine	0.9757	15.42	19.26	19.84	21.46
المقتر 2 (محسن – تجربة 1)	دعم المتجهات Vector Machine	0.9567	30.89	35.31	27.92	27.83
المقتر 3 (شاهد – تجربة 2)	الشبكة العصبية (MLP)	0.9951	0.0051	0.0083	7.06	9.80
المقتر 4 (محسن 1 – تجربة 2)	شجرة القرار	0.9966	0.0059	0.0095	5.67	8.13
المقتر 5 (محسن 2 – تجربة 2)	الغابة العشوائية Random Forest	0.9967	0.0041	0.0071	5.30	8.17

تشير هذه النتائج إلى أن التحسينات الهندسية المطبقة على المقطرات في التجربة الثانية لم تؤد فقط إلى تحسين إنتاجية المياه، بل ساهمت أيضاً في جعل البيانات أكثر انتظاماً وأقل تشتتاً، إضافة إلى تحسين جودة القياسات وزيادة حجم العينة. هذا بدوره مكّن نماذج التعلم الآلي – خصوصاً النماذج القائمة على الأشجار والتعلم العميق – من تحقيق دقة تنبؤ أعلى بكثير مقارنة بالتجربة الأولى. وعليه، يمكن القول إن التكامل بين التحسينات التصميمية واعتماد تقنيات قياس أوتوماتيكية مع اختيار النماذج الذكية المناسبة يعدّ استراتيجية فعالة لتحسين أداء المقطرات الشمسية والتنبؤ بإنتاجيتها بدقة عالية.

## 6-4 المقارنة مع أعمال سابقة

من أجل تقييم نتائج هذا العمل وموقعها ضمن السياق البحثي، تمت مقارنة أداء النماذج المستعملة في المقطرات الشمسية غير المحسنة (المقتر الأول والثالث) مع نتائج الدراسة (Murugan et al., 2023) أين تم استعمال نفس النماذج والتي تتمثل في الانحدار الخطي، شجرة القرار، MLP، الغابة العشوائية، و SVM.

أظهرت الدراسة أن الاعتماد على الضبط الأمثل للمعلمات (Hyperparameter Tuning) باستخدام تقنيتي Grid Search و Random Search مكّن من تحسين أداء النماذج بشكل ملحوظ، حيث حققت الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) أفضل أداء بمعامل تحديد بلغ ( $R^2 \approx 0.98$ ) مع قيم منخفضة لل RMSE بلغت

(0.012–0.015 L/m<sup>2</sup>) وقد اعتمدت هذه الدراسة على مقطر تقليدي أحادي الميل مع تسجيل لحظي (Real-time logging)، مما أتاح الحصول على قاعدة بيانات واسعة ودقيقة.

بالمقابل، في هذا البحث تم تقييم نفس النوع من المقطرات (الشاهد). بالنسبة للمقطر الأول (تجربة يدوية محدودة)، تحقق أفضل أداء باستعمال نموذج SVM حيث بلغ معامل الارتباط ( $R=0.9757$ )، وهي نتيجة قريبة جدًا من نتائج المقال، غير أن قيم RMSE كانت أعلى نسبيًا (19.26 ml) نتيجة محدودة عدد العينات واعتماد القياسات اليدوية، إضافة إلى عدم ضبط المعلمات بشكل معمق. أما المقطر الثالث، الذي تم فيه استخدام نظام تسجيل أوتوماتيكي عبر الأردوينو، فقد أظهر تفوقًا واضحًا على نتائج الدراسة، حيث حققت الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP) معامل ارتباط مرتفع ( $R=0.9951$ ) مع قيمة RMSE منخفضة جدًا (0.0083 L/m<sup>2</sup>)، متجاوزة بذلك دقة ANN في الدراسة.

الجدول 4-7: مقارنة أداء نماذج التعلم الآلي في التنبؤ بين الدراسة الحالية ودراسة سابقة

ملاحظات	RMSE	R / R <sup>2</sup>	افضل نموذج	طريقة جمع البيانات	نوع المقطر	الدراسة
دقة جيدة، لكن الأخطاء مرتفعة بسبب محدودية حجم البيانات وعدم ضبط المعلمات	19.26 ml	R = 0.9757	SVM	يدوي (بيانات محدودة)	مقطر شمسي احادي الميل	المقطر الأول (المقطر التقليدي في التجربة 1)
أفضل أداء، دقة أعلى من نتائج المقال بفضل زيادة حجم البيانات وانتظامها	0.0083 L/m <sup>2</sup>	R = 0.9951	MLP	أوتوماتيكي (Arduino)	مقطر شمسي احادي الميل	المقطر الثالث (المقطر التقليدي في التجربة 2)
اعتمد على Grid/Random Search لضبط المعلمات، دقة عالية جدًا	0.012–0.015 L/m <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ≈ 0.98	ANN	أوتوماتيكي	مقطر شمسي احادي الميل	Murugan et al., 2023b

من خلال الجدول 4-7 أعلاه يتضح أن نتائج هذا البحث، خصوصًا في المقطر الثالث، تفوقت على نتائج (Murugan et al., 2023) رغم أن الأخير اعتمد على تقنيات متقدمة لضبط المعلمات (Grid/Random Search). ويُعزى ذلك أساسًا إلى التحول من القياسات اليدوية إلى القياسات الأوتوماتيكية عبر الأردوينو، مما أتاح الحصول على بيانات أكثر انتظامًا وكثافة. وعليه، فإن القيمة المضافة لعملنا تتمثل في إبراز الدور الحاسم

لتحسين جودة البيانات وآلية جمعها في رفع دقة النماذج التنبؤية، وهو عامل قد يكون أكثر تأثيراً من ضبط المعلمات وحده. كما أن هذا يفتح آفاقاً مستقبلية للجمع بين الطريقتين (الضبط الأمثل + البيانات عالية الجودة) لتحقيق أداء يفوق ما هو منشور في الدراسات السابقة.

## 7-4 خاتمة

يتبين من هذا الفصل أن نماذج التعلم الآلي أثبتت كفاءتها في التنبؤ بإنتاجية المقطرات الشمسية التقليدية والمحسنة، حيث تبيّن أن دقة النماذج ترتبط أساساً بجودة البيانات وحجمها أكثر من نوع الخوارزمية نفسها. ففي التجربة الأولى، حقق نموذج SVM أفضل أداء رغم محدودية القياسات اليدوية، بينما أظهرت التجربة الثانية باستخدام النظام الأوتوماتيكي تفوقاً ملحوظاً لنماذج الشبكات العصبية والأشجار بدقة مع أخطاء منخفضة جداً. كما أكدت النتائج أن التحسينات التصميمية ساهمت في رفع الكفاءة، وأن الجمع بين تطوير التصميم واعتماد القياسات الدقيقة يمثل أساساً لنجاح النماذج التنبؤية وتعميمها مستقبلاً.

الخاتمة العامة

## الخاتمة العامة

اختتمت هذه الأطروحة دراسةً منهجيةً تهدف إلى تحسين أداء المقطر الشمسي عبر تصميمات هجينة وتجارب ميدانية في منطقة ورقلة، مرفوقة بتحليلٍ عددي وتطبيقاتٍ للتعلّم الآلي للتنبؤ بالأداء. ركّزت النتائج العملية والمحلّلة على تجربتين ميدانيتين أساسيتين، و مقارنةً متعمّقةً بين نماذج التعلّم الآلي الخمسة التي طُبّقت على مجموعات البيانات المستحصلة من التجارب.

في التجربة الأولى، مثل إدخال لوحة معدنيةٍ داخلية عاملاً هندسيًا بسيطاً لكنه فعّالاً، إذ عملت هذه اللوحة كمتنصٍ للإشعاع وموصّلٍ حراريٍ مسانِدٍ أدّى إلى تسريع تسخين ماء الحوض وزيادة فرق درجة الحرارة بين الماء والغطاء. نتج عن ذلك ارتفاع ملموس في الإنتاجية اليومية من 2.9 لتر/م<sup>2</sup> إلى 4.5 لتر/م<sup>2</sup> (زيادة ~55%)، وارتفاع في الكفاءة الحرارية من 26.7% إلى 41%. من الناحية الاقتصادية، كشف التحليل أن التكلفة الأولية للنموذج المحسّن ارتفعت بحوالي 69%، مما أطال فترة استرداد الاستثمار إلى 4.9 سنوات مقابل 4.05 سنوات للنموذج التقليدي، وهو ما يوضّح وجود توازن مطلوب بين المكسب التقني والجدوى الاقتصادية عند اعتماد التحسينات.

في التجربة الثانية قورنت ثلاثة تهيئات: المقطر الشاهد (TSS)، المقطر المحسّن بواسطة مبادل حراري يمرّ به مياه ساخنة صادرة من نظام يحاكي المياه الجوفية (MSS-1)، والمقطر المحسّن بنظام تبريد خارجي للغطاء (MSS-2). أظهرت النتائج تفوق تكوين MSS-1 من حيث الاحتفاظ بالحرارة والكفاءة الطاقوية والإنتاجية الكلية تحت ظروف مناخية مختلفة؛ فسجّل MSS-1 أقصى إنتاجية يومية ~ 4.17 لتر/م<sup>2</sup>، مقابل ~ 3.08 لتر/م<sup>2</sup> لـ MSS-2 و~ 2.89 لتر/م<sup>2</sup> لـ TSS في أيام السماء الصافية والظروف المستقرة. وعلى المستوى الاقتصادي، حقّق MSS-1 أقل تكلفة لكل لتر (~0.0091 دولار/لتر) وأسرع فترة استرداد للاستثمار (~70.7 يومًا) مقارنةً بـ 78.3 يومًا لـ TSS و73.2 يومًا لـ MSS-2، كما سجّل أعلى مؤشر Exergoeconomic بلغ 3.89 مقابل 1.92 و1.65 على التوالي. بالإضافة إلى ذلك، أظهر إدراج بيانات مناخية تاريخية طويلة الأمد (حيث كانت ~75% من السنة ذات طقس ملائم و~25% ذات ظروف غير مواتية) تأثيرًا مهمًا في تحسين واقعية التنبؤات السنوية وتقليل الانحياز الناتج عن افتراض ظروف مثالية ثابتة؛ فصارت التقديرات السنوية أكثر تحفظًا ودقة، حيث بلغ الإنتاج السنوي 1522.37 لتر/م<sup>2</sup> لـ MSS-1، مقابل 1127.57 لتر/م<sup>2</sup> لـ MSS-2 و1055.37 لتر/م<sup>2</sup> لـ TSS.

بعد جمع بيانات التجربتين، طُبّقت خمس نماذج للتعلّم الآلي (الانحدار الخطي، شجرة القرار، MLP، الغابة العشوائية، و SVM) لتحليل قدرة النماذج على التنبؤ بالإنتاجية. في بيانات التجربة الأولى برز نموذج SVM بقدرته تنبؤية عالية (R ≈ 0.9757، MAE ≈ 15.42 ml، RMSE ≈ 19.26 ml)، ما يدلّ على كفاءته في التقاط العلاقات غير الخطية بين المتغيرات. ومع تحسين جودة البيانات في التجربة الثانية (تسجيل أوتوماتيكي بواسطة نظام Arduino وتحسين انتظام القياسات)، ارتفعت دقة النماذج بشكل ملحوظ، وبدأ أن الغابة

العشوائية (RandomForest) تُقدّم أفضل أداء في بعض الحالات — لا سيما في المقطر الخامس حيث سجّلت  $R \approx 0.9967$  و  $MAE \approx 0.0041$  و  $RMSE \approx 0.0071$ . تؤكد هذه النتائج أن جودة وحجم البيانات، إلى جانب طبيعة العلاقة بين المتغيرات، تلعبان دورًا جوهريًا في اختيار النموذج الأنسب للتنبؤ.

في ختام هذه الدراسة، نؤكد أن النتائج المحصل عليها تعكس تقدمًا ملموسًا في فهم وتحسين أداء المقطر الشمسي في بيئة ورقلة الصحراوية. لقد بينت التجارب والنمذجة أن الجمع المنهجي بين التعديلات الهندسية والتكامل الحراري والقياس الذكي يؤدي إلى زيادات ملموسة في الإنتاجية والاستقرار التشغيلي، مع إمكانيات حقيقية لتقليل الفوارق الموسمية وتحسين الجدوى العملية في مواقع مشابهة. تلك النتائج لا تقتصر قيمتها على الإسهام العلمي فحسب، بل تمتد إلى تطبيقات عملية محتملة يمكن أن تدعم برامج محلية لإمداد المياه في المناطق النائية، وتوفر قاعدة لاتخاذ قرارات تصميمية وتشغيلية مبنية على بيانات وتحليلات متكاملة. إنّ تبني الحلول المقترحة مع مراعاة الجوانب الاقتصادية والبيئية قد يسهم في تحويل المقطر الشمسي من تقنية محدودة الاستخدام إلى خيار فعال ومستدام في منظومة الأمن المائي المحلي.

فيما يتعلق بالأعمال المستقبلية، نوصي بمتابعة المسارات البحثية التالية بصورة أولوية: إجراء دراسات ميدانية طويلة الأمد على نطاق تجريبي أكبر لتقييم متانة الأداء وتكاليف الصيانة في ظروف الغبار والتكلس الحقيقية؛ تطوير وتحليل استراتيجيات أمثلة متعددة الأهداف لاختيار تكوينات هجينة توازن بين الإنتاجية والتكلفة والاستدامة؛ تصميم وتنفيذ أنظمة تحكّم ذكية في الزمن الحقيقي (بما في ذلك تقنيات التعلم التعزيزي) لإدارة تشغيل المكونات الهجينة بكفاءة؛ استكشاف مواد تخزين حراري وطلاءات ماصة محلية منخفضة التكلفة وقابلة للتصنيع محليًا؛ إجراء تحليلات اقتصادية وبيئية شاملة لكل خيار هجيني لضمان جدواه على المدى المتوسط والطويل؛ ينصح بأن تركز الدراسات المستقبلية على تكامل المقطرات الشمسية مع مصادر الطاقة المتجددة الملائمة لكل سياق إقليمي، في المناطق الصحراوية المشابهة لورقلة (إشعاع شمسي عالٍ، جفاف شديد، غبار متكرر): يُفضّل دمج وحدات PV/T والمركبات الشمسية، وعامةً عبر المناطق استعمال مواد متغيرة الطور، مواد نانوية، أنظمة التبريد بأنواعها و وضع بروتوكولات صيانة وتنظيف زمنية مبنية على بيانات الرصد (مستشعرات غبار/أشعة).

# قائمة المراجع

- Abd Elaziz, M., Essa, F. A., & Elsheikh, A. H. (2021). Utilization of ensemble random vector functional link network for freshwater prediction of active solar stills with nanoparticles. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101405.
- Abd Elaziz, M., Senthilraja, S., Zayed, M. E., Elsheikh, A. H., Mostafa, R. R., & Lu, S. (2021). A new random vector functional link integrated with mayfly optimization algorithm for performance prediction of solar photovoltaic thermal collector combined with electrolytic hydrogen production system. *Applied Thermal Engineering*, 193, 117055.
- Abdelgaied, M., Zakaria, Y., Kabeel, A. E., & Essa, F. A. (2021). Improving the tubular solar still performance using square and circular hollow fins with phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102564>
- Abdelmaksoud, W. A. (2025). Enhancing water productivity of solar still using thermal energy storage material and flat plate solar collector. *Applied Water Science*, 15(2). <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02340-x>
- Abdullah, A. S., Essa, F. A., Bacha, H. Ben, & Omara, Z. M. (2020). Improving the trays solar still performance using reflectors and phase change material with nanoparticles. *Journal of Energy Storage*, 31, 101744. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101744>
- Abdullah, A. S., Joseph, A., Sharshir, S. W., Edreis, E. M. A., Attia, M. E. H., & Elashmawy, M. (2025). A review of innovative materials and techniques in solar stills: A focus on heat localization and thin film evaporation. *Results in Engineering*, 104348.
- Abo-Elfadl, S., Yousef, M. S., & Hassan, H. (2021). Energy, exergy, economic and environmental assessment of using different passive condenser designs of solar distiller. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.022>
- AbuShanab, W. S., Elsheikh, A. H., Ghandourah, E. I., Moustafa, E. B., & Sharshir, S. W. (2022). Performance improvement of solar distiller using hang wick, reflectors and phase change materials enriched with nano-additives. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101856>
- Afzal, S., Ziapour, B. M., Shokri, A., Shakibi, H., & Sobhani, B. (2023). Building energy consumption prediction using multilayer perceptron neural network-assisted models; comparison of different optimization algorithms. *Energy*, 282, 128446.
- Alawee, W. H., Abdullah, A. S., Mohammed, S. A., Majdi, A., Omara, Z. M., & Younes, M. M. (2022). Testing a single slope solar still with copper heating coil, external condenser, and phase change material. *Journal of Energy Storage*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106030>

- Alawee, W. H., Essa, F. A., Mohammed, S. A., Dhahad, H. A., Abdullah, A. S., Omara, Z. M., & Gamiel, Y. (2021). Improving the performance of pyramid solar distiller using dangled cords of various wick materials: Novel working mechanism of wick. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101550>
- Al-Obaidi, M. A., Zubo, R. H. A., Rashid, F. L., Dakkama, H. J., Abd-Alhameed, R., & Mujtaba, I. M. (2022). Evaluation of Solar Energy Powered Seawater Desalination Processes: A Review. In *Energies* (Vol. 15, Number 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15186562>
- Al-qaness, M. A., Ewees, A. A., Fan, H., Abualigah, L., Elsheikh, A. H., & Abd Elaziz, M. (2023). *Wind power prediction using random vector functional link network with capuchin search algorithm, Ain Shams Eng. J.*
- Alqsair, U. F. (2024). Enhancement the production of trays solar still via nano phase change material and preheating feed-water. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 103822. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103822>
- Alqsair, U. F., Abdullah, A. S., Younes, M. M., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2024). Augmenting hemispherical solar still performance: A multifaceted approach with reflectors, external condenser, advanced wick materials, and nano-PCM integration. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 104890. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2024.104890>
- Alsehli, M. (2024). Maximizing solar distillation efficiency and cost-effectiveness with the rotating ball spherical solar still: An energetic, exergetic, and economic analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 182, 234–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.11.076>
- Alwan, N. T., Shcheklein, S. E., & Ali, O. M. (2021). Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101216>
- Anika, U. A., Kibria, M. G., Kanka, S. D., Mohtasim, M. S., Paul, U. K., & Das, B. K. (2024a). Exergy, exergo-economic, environmental and sustainability analysis of pyramid solar still integrated hybrid nano-PCM, black sand, and sponge. *Solar Energy*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112559>
- Anika, U. A., Kibria, M. G., Kanka, S. D., Mohtasim, M. S., Paul, U. K., & Das, B. K. (2024b). Exergy, exergo-economic, environmental and sustainability analysis of pyramid solar still integrated hybrid nano-PCM, black sand, and sponge. *Solar Energy*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112559>
- Anju, L. (2016). ISSN: 2454-132X Impact factor: 4.295 Distance Sensing with Ultrasonic Sensor and Arduino. In *International Journal of Advance Research*. [www.ijariit.com](http://www.ijariit.com)

- Arana Juve, J. M., Christensen, F. M. S., Wang, Y., & Wei, Z. (2022). Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 435). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134857>
- Arduino. (2025). *Arduino Mega 2560 Rev3*.  
<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Arunkumar, T., Wang, J., Dsilva Winfred Rufuss, D., Denkenberger, D., & Kabeel, A. E. (2020). Sensible desalting: Investigation of sensible thermal storage materials in solar stills. *Journal of Energy Storage*, 32, 101824.  
<https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101824>
- Ashraf, E., Kabeel, A. E., Elmashad, Y., Ward, S. A., & Shaban, W. M. (2023). Predicting solar distiller productivity using an AI Approach: Modified genetic algorithm with Multi-Layer Perceptron. *Solar Energy*, 263, 111964.
- Attia, M. E. H., Karthick, A., Manokar, A. M., Driss, Z., Kabeel, A. E., Sathyamurthy, R., & Sharifpur, M. (2021). Sustainable potable water production from conventional solar still during the winter season at Algerian dry areas: energy and exergy analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3), 1215–1225.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-020-10277-x>
- Azam, F., Akhtar, N., & Husain, S. (2025). Machine learning models for performance estimation of solar still in a humid sub-tropical region. *Discover Atmosphere*, 3(1), 1–17.
- Azhari, Nasution, T. I., Sinaga, S. H., & Sudiati. (2023). Design of Monitoring System Temperature And Humidity Using DHT22 Sensor and NRF24L01 Based on Arduino. *Journal of Physics: Conference Series*, 2421(1).  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012018>
- Bamasag, A., Essa, F. A., Omara, Z. M., Bahgat, E., Alsaiari, A. O., Abulkhair, H., Alsulami, R. A., & Elsheikh, A. H. (2022). Machine learning-based prediction and augmentation of dish solar distiller performance using an innovative convex stepped absorber and phase change material with nanoadditives. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 112–123.
- Bataineh, K. M., & Abbas, M. A. (2020). Performance analysis of solar still integrated with internal reflectors and fins. *Solar Energy*, 205, 22–36.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.059>
- Chauhan, R., Dumka, P., & Mishra, D. R. (2022). Experimental evaluation and development of artificial neural network model for the solar stills augmented with the permanent magnet and sandbag. *J Adv Therm Sci Res*, 9, 9–23.
- Chauhan, R., Sharma, S., Pachauri, R., Dumka, P., & Mishra, D. R. (2020). Experimental and theoretical evaluation of thermophysical properties for

- moist air within solar still by using different algorithms of artificial neural network. *Journal of Energy Storage*, 30, 101408.
- Chemkhi, S., & Madiouli, J. (2022). Experimental study of a single slope solar distiller: productivity improvement by sensible heat storage materials. In *International Days on Thermal Science and Energy* (pp. 353–362). Springer.
- Danish, S. N., El-Leathy, A., Alata, M., & Al-Ansary, H. (2019). Enhancing solar still performance using vacuum pump and geothermal energy. *Energies*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/en12030539>
- Dey, A. (2016). Machine learning algorithms: a review. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 7(3), 1174–1179.
- Dhivagar, R., Jidhesh, P., Omara, A. A. M., Kannan, K. G., Prabakaran, R., & Kim, S. C. (2025). A comprehensive assessment on a double slope solar still integrated with solar photovoltaic panel and phase change material for sustainable power and freshwater cogeneration. *Applied Thermal Engineering*, 274, 126676. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2025.126676>
- Dhivagar, R., & Kannan, K. G. (2022). Thermodynamic and economic analysis of heat pump-assisted solar still using paraffin wax as phase change material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 3131–3140. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17183-1>
- El Hadi Attia, M., Zayed, M. E., Kabeel, A. E., Abdullah, A. S., & Abdelgaied, M. (2023). Energy, exergy, and economic analyses of a modified hemispherical solar distiller augmented with convex absorber basin, wicks, and PCM. *Solar Energy*, 261, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.057>
- Elashmawy, M. (2017). An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still. *Desalination*, 411, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.02.003>
- Elaziz, M. A., Essa, F. A., Khalil, H. A., El-Sebaey, M. S., Khedr, M., & Elsheikh, A. (2024). Productivity prediction of a spherical distiller using a machine learning model and triangulation topology aggregation optimizer. *Desalination*, 585, 117744. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2024.117744>
- Elgendi, M., & Atef, M. (2023). Calculating the impact of meteorological parameters on pyramid solar still yield using machine learning algorithms. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100341.
- El-Ghandour, M., Elminshawy, N. A. S., & Soliman, M. S. (2025). Performance of a solar still combined with external energy storage and Fresnel lens concentrator. *Journal of Energy Storage*, 128, 117222. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2025.117222>

- Elsheikh, A. H., Saba, A. I., Abd Elaziz, M., Lu, S., Shanmugan, S., Muthuramalingam, T., Kumar, R., Mosleh, A. O., Essa, F. A., & Shehabeldeen, T. A. (2021). Deep learning-based forecasting model for COVID-19 outbreak in Saudi Arabia. *Process Safety and Environmental Protection*, *149*, 223–233.
- Elsheikh, A. H., Shanmugan, S., Sathyamurthy, R., Thakur, A. K., Issa, M., Panchal, H., Muthuramalingam, T., Kumar, R., & Sharifpur, M. (2022). Low-cost bilayered structure for improving the performance of solar stills: Performance/cost analysis and water yield prediction using machine learning. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *49*, 101783.
- Elsheikh, A. H., Sharshir, S. W., Abd Elaziz, M., Kabeel, A. E., Guilan, W., & Haiou, Z. (2019). Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. *Solar Energy*, *180*, 622–639.
- Eltawil, M. A., & Omara, Z. M. (2014). Enhancing the solar still performance using solar photovoltaic, flat plate collector and hot air. *Desalination*, *349*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2014.06.021>
- Esfahani, J. A., Rahbar, N., & Lavvaf, M. (2011). Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still — An experimental study on winter days. *Desalination*, *269*(1–3), 198–205. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2010.10.062>
- Essa, F. A., Abd Elaziz, M., & Elsheikh, A. H. (2020). An enhanced productivity prediction model of active solar still using artificial neural network and Harris Hawks optimizer. *Applied Thermal Engineering*, *170*, 115020.
- Essa, F. A., Abdullah, A. K., Majdi, H. S., Basem, A., Dhahad, H. A., Omara, Z. M., Mohammed, S. A., Alawee, W. H., Ezzi, A. Al, & Yusaf, T. (2022). Parameters Affecting the Efficiency of Solar Stills—Recent Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Number 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su141710668>
- Essa, F. A., Abdullah, A. S., Alawee, W. H., Alarjani, A., Alqsair, U. F., Shanmugan, S., Omara, Z. M., & Younes, M. M. (2022). Experimental enhancement of tubular solar still performance using rotating cylinder, nanoparticles' coating, parabolic solar concentrator, and phase change material. *Case Studies in Thermal Engineering*, *29*. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101705>
- Essa, F. A., Abou-Taleb, F. S., & Diab, M. R. (2025). Experimental investigation of vertical solar still with rotating discs. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *47*(1), 9458–9478. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1950238>
- Essa, F. A., Alawee, W. H., Mohammed, S. A., Abdullah, A. S., & Omara, Z. M. (2021). Enhancement of pyramid solar distiller performance using reflectors, cooling cycle, and dangled cords of wicks. *Desalination*, *506*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115019>

- FAO. (2025). *Water scarcity*. [https://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/?utm_source=chatgpt.com)
- Fathy, M., Hassan, H., & Salem Ahmed, M. (2018). Experimental study on the effect of coupling parabolic trough collector with double slope solar still on its performance. *Solar Energy*, *163*, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.043>
- Fekraoui A. (2010). Geothermal Activities in Algeria. In *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Fritzing Team. (2025). *Fritzing*. <https://fritzing.org/>
- Ghandourah, E., Panchal, H., Fallatah, O., Ahmed, H. M., Moustafa, E. B., & Elsheikh, A. H. (2022). Performance enhancement and economic analysis of pyramid solar still with corrugated absorber plate and conventional solar still: A case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, *35*, 101966.
- Gopi, G., Premalatha, M., & Arthanareeswaran, G. (2022). Transient mathematical modelling and investigation of radiation and design parameters on the performance of multi-effect solar still integrated with evacuated tube collector. *Energy Conversion and Management: X*, *14*. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100210>
- Gude, V. G., & Fthenakis, V. (2020). Energy efficiency and renewable energy utilization in desalination systems. *Progress in Energy*, *2*(2), 022003.
- Hale, G. (2020). The Effect of COVID-19 on CO2 Emissions. *California, CA, USA: University of California*.
- Hameed, H. G. (2022). Experimentally evaluating the performance of single slope solar still with glass cover cooling and square cross-section hollow fins. *Case Studies in Thermal Engineering*, *40*. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102547>
- Hammadi, S. H. (2020). Integrated solar still with an underground heat exchanger for clean water production. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *32*(5), 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.04.004>
- Hassan, H. (2020). Comparing the performance of passive and active double and single slope solar stills incorporated with parabolic trough collector via energy, exergy and productivity. *Renewable Energy*, *148*, 437–450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.050>
- Hassan, H., & Abo-Elfadl, S. (2017). Effect of the condenser type and the medium of the saline water on the performance of the solar still in hot climate conditions. *Desalination*, *417*, 60–68. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.05.014>
- Hassan, H., Ahmed, M. S., & Fathy, M. (2019). Experimental work on the effect of saline water medium on the performance of solar still with tracked

- parabolic trough collector (TPTC). *Renewable Energy*, 135, 136–147. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.11.112>
- Hassan, H., Ahmed, M. S., Fathy, M., & Yousef, M. S. (2020). Impact of salty water medium and condenser on the performance of single acting solar still incorporated with parabolic trough collector. *Desalination*, 480, 114324. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2020.114324>
- Hassan, H., Yousef, M. S., & Fathy, M. (2021). Productivity, exergy, exergoeconomic, and enviroeconomic assessment of hybrid solar distiller using direct salty water heating. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(5), 5482–5494. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10803-2>
- Hassan, H., Yousef, M. S., Fathy, M., & Ahmed, M. S. (2020). Assessment of parabolic trough solar collector assisted solar still at various saline water mediums via energy, exergy, exergoeconomic, and enviroeconomic approaches. *Renewable Energy*, 155, 604–616. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.126>
- Hassan, R., Barua, H., & Das, B. K. (2021). Energy, exergy, exergo-environmental, and exergetic sustainability analyses of a gas engine-based CHP system. *Energy Science & Engineering*, 9(12), 2232–2251.
- Hosseinfard, F., Salimi, M., & Amidpour, M. (2025). Evaluating economic feasibility and machine learning-driven prediction for solar still desalination in Iran. *Results in Engineering*, 25, 103823.
- Huang, X., Wang, H., Luo, W., Xue, S., Hayat, F., & Gao, Z. (2021). Prediction of loquat soluble solids and titratable acid content using fruit mineral elements by artificial neural network and multiple linear regression. *Scientia Horticulturae*, 278, 109873.
- Ibrahim, A. G. M., Allam, E. E., & Elshamarka, S. E. (2015). A modified basin type solar still: Experimental performance and economic study. *Energy*, 93, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.045>
- Immanual, R., Kannan, K., Sanjana, N., & Kirthika, K. M. (2025). Performance enhancement of solar still desalination using sound agitation and condensation: A comparative study. *Desalination and Water Treatment*, 321, 100923. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100923>
- Jasim, M. A., Ahmed, O. K., & Alaiwi, Y. (2023). Performance of solar stills integrated with PV/Thermal solar collectors: A review NTU Journal for Renewable Energy Available online at: <https://journals.ntu.edu.iq/index.php/NTU-JRE>. *NTU Journal for Renewable Energy*, 4(1), 97–111. <https://doi.org/10.56286/ntujre.v4i1>
- Jodah, F. T., Alawee, W. H., Dhahad, H. A., & Omara, Z. M. (2024). Comparative analysis of design parameters impacting the performance of pyramidal and spherical solar stills: A review. In *Desalination and Water*

- Treatment* (Vol. 319). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100545>
- Jo'rayev, F. D., Ochilov, M. A., Rakhimov, A. M., & Doliyev, S. Q. (2023). Algorithms for improving models of optimal control for multi-parametric technological processes based on artificial intelligence. *E3S Web of Conferences*, 460, 04013.
- Kabeel, A. E., Abdelaziz, G. B., & El-Said, E. M. S. (2019). Experimental investigation of a solar still with composite material heat storage: Energy, exergy and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 231, 21–34.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.200>
- Kabeel, A. E., & Abdelgaied, M. (2017). Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin. *Solar Energy*, 144, 71–78.  
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.01.007>
- Kabeel, A. E., Attia, M. E. H., Bellila, A., El-Maghlany, W. M., Fayed, M., Abdullah, A. S., & Zidane, I. F. (2023). The impact of the corrugated absorber shape on the performance of a hemispherical solar still for water desalination: an experimental study. *Applied Water Science*, 13(4).  
<https://doi.org/10.1007/s13201-023-01907-4>
- Kabeel, A. E., Elazab, M. A., El Hadi Attia, M., Elshaarawy, M. K., Hamed, A. K., Alsaadawi, M. M., Elnasr, M. A., & Bady, M. (2024). Exploring the potential of conical solar stills: Design optimization and enhanced performance overview. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100642.  
<https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100642>
- Kabeel, A. E., Harby, K., Abdelgaied, M., & Eisa, A. (2020). A comprehensive review of tubular solar still designs, performance, and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119030.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119030>
- Kabeel, A. E., Khairat Dawood, M. M., Ramzy, K., Nabil, T., Elnaghi, B., & elkassar, A. (2019). Enhancement of single solar still integrated with solar dishes: An experimental approach. *Energy Conversion and Management*, 196, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.112>
- Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2021). Techno-economic review of solar distillation systems: A closer look at the recent developments for commercialisation. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 294). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126289>
- Kemerchou, I., Abderrahim, A., Khechekhouche, A., & Bellila, A. (2024). Enhancing solar still efficiency in southeastern Algeria: An experimental case with palm stems. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100148.  
<https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100148>

- Khairat Dawood, M. M., Nabil, T., Kabeel, A. E., Shehata, A. I., Abdalla, A. M., & Elnaghi, B. E. (2020). Experimental study of productivity progress for a solar still integrated with parabolic trough collectors with a phase change material in the receiver evacuated tubes and in the still. *Journal of Energy Storage*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102007>
- Khan, M. A. Z., Wahab, A., Khan, K., Ahmad, N., & Kamran, M. A. (2023). Energy, exergy, exergo-economic, enviro-economic, exergo-environmental, exergo-enviro-economic, sustainability and sensitivity (6E, 2S) analysis on single slope solar still—An experimental study. *PLoS One*, 18(8), e0290250.
- Khanmohammadi, S., Khanjani, S., & Musharavati, F. (2022). Experimental study and economic examination of double-glazed solar still desalination with a thermoelectric cooling system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102854>
- Khatod, K. J., Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2022). An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104622. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.104622>
- Kondaveeti, H. K., Kumaravelu, N. K., Vanambathina, S. D., Mathe, S. E., & Vappangi, S. (2021). A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. In *Computer Science Review* (Vol. 40). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>
- Kouravand, A., Tamjid Shabestari, S., Zirak, N., Kasaeian, G., Fereidooni, L., & Kasaeian, A. (2025). Thermal management strategies for a portable double slope solar still with energy storage: An experimental study for enhancing the performance. *Next Energy*, 8, 100244. <https://doi.org/10.1016/J.NXENER.2025.100244>
- Louis, L. (2016). Working Principle of Arduino and Using it as a Tool for Study and Research. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems*, 1(2), 21–29. <https://doi.org/10.5121/ijcacs.2016.1203>
- Madhuri, R. V. S., Said, Z., Ihsanullah, I., & Sathyamurthy, R. (2025). Solar energy-driven desalination: A renewable solution for climate change mitigation and advancing sustainable development goals. In *Desalination* (Vol. 602). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118575>
- Mahian, O., Kianifar, A., Heris, S. Z., Wen, D., Sahin, A. Z., & Wongwises, S. (2017). Nanofluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger. *Nano Energy*, 36, 134–155. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2017.04.025>
- Manokar, A. M., Vimala, M., Sathyamurthy, R., Kabeel, A. E., Winston, D. P., & Chamkha, A. J. (2020). Enhancement of potable water production from

- an inclined photovoltaic panel absorber solar still by integrating with flat-plate collector. *Environment, Development and Sustainability*, 22(5), 4145–4167. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00376-7>
- Mashaly, A. F., & Alazba, A. A. (2017a). Application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for modeling solar still productivity. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 66(6), 367–380.
- Mashaly, A. F., & Alazba, A. A. (2017b). Artificial intelligence for predicting solar still production and comparison with stepwise regression under arid climate. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 66(3), 166–177.
- Maxim Inc. (2021). *MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple- to-Digital Converter (0°C to +1024°C)*. [www.maximintegrated.com](http://www.maximintegrated.com)
- Melouah, O., Eldosouky, A. M., & Ebong, E. D. (2021). Crustal architecture, heat transfer modes and geothermal energy potentials of the Algerian Triassic provinces. *Geothermics*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102211>
- Muftah, A. F., Alghoul, M. A., Fudholi, A., Abdul-Majeed, M. M., & Sopian, K. (2014). Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 32, pp. 430–447). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.052>
- Murugan, D. K., Said, Z., Panchal, H., Gupta, N. K., Subramani, S., Kumar, A., & Sadasivuni, K. K. (2023a). Machine learning approaches for real-time forecasting of solar still distillate output. *Environmental Challenges*, 13, 100779.
- Murugan, D. K., Said, Z., Panchal, H., Gupta, N. K., Subramani, S., Kumar, A., & Sadasivuni, K. K. (2023b). Machine learning approaches for real-time forecasting of solar still distillate output. *Environmental Challenges*, 13, 100779.
- Nazari, S., Bahiraei, M., Moayedi, H., & Safarzadeh, H. (2020). A proper model to predict energy efficiency, exergy efficiency, and water productivity of a solar still via optimized neural network. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123232.
- Nazari, S., Safarzadeh, H., & Bahiraei, M. (2019). Performance improvement of a single slope solar still by employing thermoelectric cooling channel and copper oxide nanofluid: An experimental study. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1041–1052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.194>
- Okati, V., Ebrahimi-Moghadam, A., Behzadmehr, A., & Farzaneh-Gord, M. (2019). Proposal and assessment of a novel hybrid system for water desalination using solar and geothermal energy sources. *Desalination*, 467, 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.011>

- Ouali, S., Hadjiat, M. M., Ait-Ouali, A., Salhi, K., & Malek, A. (2018). Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. *Revue Des Energies Renouvelables*, 21, 54–61. <https://doi.org/10.54966/jreen.v21i1.669>
- Özcan, Y., & Deniz, E. (2023). Solar thermal waste heat energy recovery in solar distillation systems by using thermoelectric generators. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 40, 101362. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2023.101362>
- Özcan, Y., Gürdal, M., & Deniz, E. (2025). Thermal behavior in solar distillation system using experimental and machine learning approach with scaled conjugated gradient algorithm. *Desalination*, 606, 118765.
- Pal, P., Dev, R., Singh, D., & Ahsan, A. (2018). Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of modified multi-wick basin type double slope solar still. *Desalination*, 447, 55–73.
- Pal, P., Kumar Patel, S., Bharti, A., Narayan, A., Dev, R., & Singh, D. (2021). Energy, exergy, energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic assessment of modified solar stills. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101514>
- Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 693). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>
- Panchal, H., Mevada, D., Sadasivuni, K. K., Essa, F. A., Shanmugan, S., & Khalid, M. (2020). Experimental and water quality analysis of solar stills with vertical and inclined fins. *Groundwater for Sustainable Development*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100410>
- Pandey, N., & Naresh, Y. (2024). A comprehensive 4E (energy, exergy, economic, environmental) analysis of novel pyramid solar still coupled with pulsating heat pipe: An experimental study. *Renewable Energy*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120227>
- Parsa, S. M., Rahbar, A., Javadi, D., Koleini, M. H., Afrand, M., & Amidpour, M. (2020). Energy-matrices, exergy, economic, environmental, exergoeconomic, enviroeconomic, and heat transfer (6E/HT) analysis of two passive/active solar still water desalination nearly 4000m: Altitude concept. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121243.
- Parsa, S. M., Rahbar, A., Koleini, M. H., Aberoumand, S., Afrand, M., & Amidpour, M. (2020). A renewable energy-driven thermoelectric-utilized solar still with external condenser loaded by silver/nanofluid for simultaneously water disinfection and desalination. *Desalination*, 480, 114354. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2020.114354>

- Rahbar, N., Gharaiian, A., & Rashidi, S. (2017). Exergy and economic analysis for a double slope solar still equipped by thermoelectric heating modules - an experimental investigation. *Desalination*, 420, 106–113.  
<https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.07.005>
- SAADA, Y., BENMENINE, D., SETTOU, B., & KORICHI, Z. (2025). Experimental Investigation of Solar Desalination in Algeria: Performance, Economic Feasibility, and Climatic Variability Analysis of Geothermal-Integrated and Glass-Cooled Solar Stills. *Energy*, 136875.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.136875>
- Saada, Y., Korichi, Z., Souigat, A., Slimani, D., & Benmenine, D. (2025). New design of solar still hybridized internally with solar collector to improve productivity. *Desalination and Water Treatment*, 321.  
<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100959>
- Saavedra, A., Valdés, H., Mahn, A., & Acosta, O. (2021). Comparative analysis of conventional and emerging technologies for seawater desalination: Northern Chile as a case study. In *Membranes* (Vol. 11, Number 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes11030180>
- Sadeghi, G., & Nazari, S. (2021). Retrofitting a thermoelectric-based solar still integrated with an evacuated tube collector utilizing an antibacterial-magnetic hybrid nanofluid. *Desalination*, 500, 114871.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114871>
- Saha, S., Sarker, M. R. I., Kader, M. A., Ahmed, M. M., Tuly, S. S., & Mustafi, N. N. (2024). Development of a vacuum double-slope solar still for enhanced freshwater productivity. *Solar Energy*, 270, 112385.  
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2024.112385>
- Saibi, H. (2009). Geothermal resources in Algeria. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Number 9, pp. 2544–2552).  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.019>
- Saini, V., Sahota, L., Jain, V. K., & Tiwari, G. N. (2019). Performance and cost analysis of a modified built-in-passive condenser and semitransparent photovoltaic module integrated passive solar distillation system. *Journal of Energy Storage*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100809>
- Sambare, R. K., Joshi, S., & Kanojiya, N. C. (2023). Improving the freshwater production from tubular solar still using sensible heat storage materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 38, 101676.  
<https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2023.101676>
- Sarhaddi, F. (2018). Exergy analysis of a weir-type cascade solar still connected to PV/T collectors. *IET Renewable Power Generation*, 12(12), 1336–1344.  
<https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5162>
- Settou, B., Settou, N., Gahrar, Y., Negrou, B., Bouferrouk, A., Gouareh, A., & Mokhtara, C. (2022). Geographic information-driven two-stage

- optimization model for location decision of solar power plant: A case study of an Algerian municipality. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103567. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103567>
- Shakirovich Ismailov Zafar Botirovich Jo, A. (2022). *Study of arduino microcontroller board*. [www.openscience.uz](http://www.openscience.uz)
- Sharshir, S. W., Kandeal, A. W., Ismail, M., Abdelaziz, G. B., Kabeel, A. E., & Yang, N. (2019). Augmentation of a pyramid solar still performance using evacuated tubes and nanofluid: Experimental approach. *Applied Thermal Engineering*, 160, 113997. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.113997>
- Shehata, A. I., Kabeel, A. E., Khairat Dawood, M. M., Elharidi, A. M., Abd\_Elsalam, A., Ramzy, K., & Mehanna, A. (2020). Enhancement of the productivity for single solar still with ultrasonic humidifier combined with evacuated solar collector: An experimental study. *Energy Conversion and Management*, 208, 112592. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112592>
- Shi, L., Wang, X., Hu, Y., He, Y., & Yan, Y. (2020). Solar-thermal conversion and steam generation: a review. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115691.
- Shoeibi, S., Rahbar, N., Abedini Esfahlani, A., & Kargarsharifabad, H. (2020). Application of simultaneous thermoelectric cooling and heating to improve the performance of a solar still: An experimental study and exergy analysis. *Applied Energy*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114581>
- Shoeibi, S., Rahbar, N., Abedini Esfahlani, A., & Kargarsharifabad, H. (2021). Improving the thermoelectric solar still performance by using nanofluids—Experimental study, thermodynamic modeling and energy matrices analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101339>
- Sibagariang, Y. P., Napitupulu, F. H., Kawai, H., & Ambarita, H. (2022). Investigation of the effect of a solar collector, nozzle, and water cooling on solar still double slope. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102489>
- Singh, A. K., Singh, D. B., Mallick, A., Harender, Sharma, S. K., Kumar, N., & Dwivedi, V. K. (2019). Performance analysis of specially designed single basin passive solar distillers incorporated with novel solar desalting stills: A review. In *Solar Energy* (Vol. 185, pp. 146–164). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.040>
- Singh, D., Singh, D., Mishra, V., Kushwaha, J., Dev, R., Patel, S. K., Shankar, R., & Giri, B. S. (2023). Sustainability issues of solar desalination hybrid systems integrated with heat exchangers for the production of drinking water: A review. *Desalination*, 566. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116930>

- Singh, R. V., Kumar, S., Hasan, M. M., Khan, M. E., & Tiwari, G. N. (2013). Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode. *Desalination*, 318, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.012>
- Slimani, D., Souigat, A., Korichi, Z., Benkrima, Y., Benbrahim, F., Benbessisse, Y., & Labed, B. (2024). Using solar distillation to treat salty water sub-surface in the Hassi Miloud area (Algeria) for agricultural watering a drop with a drop. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100032.
- Sohani, A., Hoseinzadeh, S., Samiezadeh, S., & Verhaert, I. (2022a). Machine learning prediction approach for dynamic performance modeling of an enhanced solar still desalination system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(5), 3919–3930.
- Sohani, A., Hoseinzadeh, S., Samiezadeh, S., & Verhaert, I. (2022b). Machine learning prediction approach for dynamic performance modeling of an enhanced solar still desalination system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(5), 3919–3930.
- Srivastava, D., Kesarwani, A., & Dubey, S. (2008). Measurement of Temperature and Humidity by using Arduino Tool and DHT11. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 876. [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- Subramanian, R. S., Kumaresan, G., Ajith, R., Sabarivasan, U., Gowthamaan, K. K., & Anudeep, S. (2021). Performance analysis of modified solar still integrated with flat plate collector. *Materials Today: Proceedings*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.409>
- Tahir, M. (2021). Measuring water Flow Rate and Volume using Arduino and Flow Sensor. *Department of Irrigation & Drainage Faculty of Agricultural Engineering*.
- Tuly, S. S., Ayon, A. B. S., Hassan, R., Das, B. K., Khan, R. H., & Sarker, M. R. I. (2022). Performance investigation of active double slope solar stills incorporating internal sidewall reflector, hollow circular fins, and nanoparticle-mixed phase change material. *Journal of Energy Storage*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105660>
- (UNICEF) and (WHO). (2023). *PROGRESS ON HOUSEHOLD DRINKING WATER, SANITATION AND HYGIENE 2000-2022*.
- UN-Water. (2024). *Progress on the level of water stress*.
- UN-Water. (2025). *Water scarcity*. [https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity?utm_source=chatgpt.com)
- Verma, S., Das, R., & Mishra, N. K. (2023). Concept of integrating geothermal energy for enhancing the performance of solar stills. *Desalination*, 564, 116817. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116817>

- Walczak, S. (2019). Artificial neural networks. In *Advanced methodologies and technologies in artificial intelligence, computer simulation, and human-computer interaction* (pp. 40–53). IGI Global Scientific Publishing.
- Wang, G. C. S., & Jain, C. L. (2003). *Regression analysis: modeling & forecasting*. Institute of Business Forec.
- Yang, L., Wu, H., Jin, X., Zheng, P., Hu, S., Xu, X., Yu, W., & Yan, J. (2020). Study of cardiovascular disease prediction model based on random forest in eastern China. *Scientific Reports*, *10*(1), 5245.
- Yousef, M. S., & Hassan, H. (2019). Assessment of different passive solar stills via exergoeconomic, exergoenvironmental, and exergoenvironoeconomic approaches: a comparative study. *Solar Energy*, *182*, 316–331.
- Yousef, M. S., & Hassan, H. (2020). Energy payback time, exergoeconomic and enviroeconomic analyses of using thermal energy storage system with a solar desalination system: an experimental study. *Journal of Cleaner Production*, *270*, 122082.
- Zayed, M. E., Katekar, V. P., Tripathy, R. K., Deshmukh, S. S., & Elsheikh, A. H. (2022). Predicting the yield of stepped corrugated solar distiller using kernel-based machine learning models. *Applied Thermal Engineering*, *213*, 118759.
- Zohuri, B. (2024). Artificial Intelligence and Machine Learning Driven Adaptive Control Applications. *Journal of Material Sciences and Engineering Technology*, *2*(4), 1–4.

الملحق

الملحق A

يمثل الشكل 1 A خطوات تركيب وحدات التقطير الشمسية للأنظمة الثلاثة:



الشكل 1 A: خطوات تركيب المقطرات الشمسية و وحدة التحكم اوردوينو

بطاقة تقنية خاصة بالمزدوجات الحرارية المستعملة في التجربة:

**0.01 degree, Pt 100, type K/J/R/E/T, RS232  
PRECISION THERMOMETER**

**Model : TM-917**

**ISO-9001, CE, IEC1010**



PT-100 ohm

Temp. probe, optional



**Lutron**  
LUTRON ELECTRONIC

**The Art of Measurement**

# PRECISION 0.01 degree THERMOMETER

## Model : TM-917

FEATURES	
* Professional thermometer with high accuracy & 0.01 resolution.	* Build in 0.01& 0.1select switch on the front panel.
* Accept multi type temp. probe input : platinum PT 100 ohm, thermocouple type K/J/T/E/R.	* Super large LCD with unit display, easy readout.
* With 0.01 high resolution both for Platinum & Thermocouple probe input.	* Data hold function for stored the desired value on display.
* PT 100 probe input cooperate with an 0.00385 alpha coefficient, meet DIN IEC 751.	* Sensor select button on the front panel, easy to change different type probe.
* Cooperate with 4 wires Pt-100 ohm probe, high precision.	* Memory function to record the maximum & minimum reading with recall.
* Wide range display from -100 to 1370 °C ( type k ).	* Build the REL. button, useful for relative measurement.
* Build in °C & °F select button on the front panel.	* Built-in low battery indicator.
	* Optional heavy duty & compact housing case, designed for easy carry out.

GENERAL SPECIFICATIONS			
Display	62 mm x 34 mm supper large LCD display, 13 mm ( 0.5" ) digit size.	Sampling Time	Approx. 0.4 second.
Probe type	5 types : 1. Platinum PT 100 ohm ( 0.00385 alpha coefficient, meet DIN IEC 751 ) 2. Thermocouple type K. 3. Thermocouple type J. 4. Thermocouple type T. 5. Thermocouple type E. 6. Thermocouple type R.	Hold Function	To freeze the display reading value.
		Memory Recall	Memorize the Maximum, Minimum reading with recall.
		Over Indication	Show " - - - - ".
		Data Output	RS232 PC serial interface.
		Power Supply	Heavy duty or Alkaline type, DC 9V battery, 006P, MN1604 ( PP3 ) or equivalent.
		Power Consumption	Approx. DC 15 mA.
Functions	°C, °F, 0.01/0.1 Data hold, relative measurement.	Operating Temperature	0 to 50 °C ( 32 to 122 °F).
Resolution	0.01°C/0.1°C, 0.01°F/0.1°F.	Operating Humidity	Less than 80% RH.
Circuit	Use the software to make linearity correction instead the traditional hardware circuit.	Meter Size	HWD 180x72x32 mm ( 7.1x2.8x1.3 inch
Probe input socket	Pt 100 ohm probe : DIN 4 pin socket. Thermocouple couple probe : Standard 2 pin type K socket.	Meter Weight	285 g/0.62 LB.
		Standard	Operational manual..... 1 PC.
		Accessory	
		Optional	Carrying case, Pt-100 probe, Type K Thermocouple probe.
		Accessories	

MEASURING RESOLUTION / RESOLUTION					
Type	Resolution	Range	Type	Resolution	Range
Platinum PT 100 ohm	0.01 °C	-199.99 to 199.99 °C	Thermocouple type T	0.01 °C	-100.00 to 100.00 °C
	0.1 °C	200.0 to 850.0 °C		0.1 °C	100.0 to 400.0 °C
	0.02 °F	-199.99 to 392.00 °F		0.02 °F	-148.00 to 212.00 °F
	0.2 °F	392.0 to 1562.0 °F	0.2 °F	212.0 to 752.0 °F	
Thermocouple type K	0.01 °C	-100.00 to 100.00 °C	Thermocouple type E	0.01 °C	-80.00 to 90.00 °C
	0.1 °C	100.0 to 1370.0 °C		0.1 °C	90.0 to 779.9 °C
	0.02 °F	-148.00 to 212.00 °F		0.02 °F	-112.00 to 194.00 °F
	0.2 °F	212.0 to 2498.0 °F		0.2 °F	194.0 to 1435.8 °F
Thermocouple type J	0.01 °C	-90.00 to 100.00 °C	Thermocouple type R	0.1 °C	0 to 600.0 °C
	0.1 °C	100.0 to 900.0 °C		1 °C	600 to 1770 °C
	0.02 °F	-130.00 to 212.00 °F		0.2 °F	32.0 to 112.0 °F
	0.2 °F	212.0 to 1652.0 °F		1 °F	112 to 3218 °F

OPTIONAL TEMPERATURE PROBE & OTHER ACCESSORIES	
Carrying Case	Model : CA-03, Vinyl soft carrying case.
Carrying Case	Model : CA-06, Hard carrying case
PT-100 ohm Probe	* -50 °C to 400 °C (-58 °F to 752 °F), DIN plug, 4 pins/4 wires, Class A, Cooperate with an 0.00385 alpha coefficient, meet DIN IEC 751, Accuracy : (0.15 + (0.002 x T))°C.
TP-100	* Dimension Sensing head - 152 mm tube, Probe length - 245 mm.
TP-100A	
Thermocouple Probe (Type K) TP-01	* Measure Rage: -40 °C to 250 °C, -40 °F to 482 °F. * Ultra fast response naked-bead thermocouple, general purpose application.
Thermocouple Probe (Type K), TP-02A	* Measure Range: -50 °C to 900 °C, -50 °F to 1650 °F. * Dimension: 10 cm tube, 3.2 mm Dia.
Thermocouple Probe (Type K), TP-03	* Measure Range: -50 °C to 1200 °C, -50 °F to 2200 °F. * Dimension: 10 cm tube, 8 mm Dia.
Surface Probe (Type K), TP-04	* Measure Range: -50 °C to 400 °C, -50 °F to 752 °F. * Size : Temp. sensing head - 15 mm Dia. Probe length - 120 mm.
RS232 cable	Model : UPGB-01, RS232 cable for connecting between the meter & computer COM port
USB cable	Model : USB-01, USB cable for connecting between the meter & the computer USB port.
Software	Model : SW-U801-WIN, Windows version. * Software apply as the performance of data logging system & data recorder...

\* Appearance and specifications listed in this brochure are subject to change without notice.

0609-TM917

## :Anemometer بطاقة تقنية بجهاز قياس سرعة الريح

UNI-T

### UT361/362

#### Operating Manual



Anemoscopes

#### Overview

UT361 and UT362 Anemoscopes are designed with built-in high precision thermistor as air temperature sensor and a highly durable ruby vane ring to maintain accurate and stable measurements, and also offer 8-bit micro-processor for data processing. The instrument measures real-time air velocity (m/s, km/h, ft/min, mph, knots), air flow (CFM, CMH) and air temperature (°F/°C). It also comes with remarkable features: dual display (Wind Temp, Flow Temp), Max/Min/Average, data hold, data storage up to 2044 sets, auto power off, PC communication (UT362 only).

This Operating Manual covers information related to the safe operation of the Anemoscope. Please read the relevant information carefully and observe all the Warnings and Notes strictly.

#### Warning

To avoid electric shock or personal injury, read the "Safety Information" carefully before using the Anemoscope.

#### Unpacking Inspection

Open the package case and take out the Meter. Check the following items carefully for any missing or damaged part:

Item	Description	Qty
1	English Operating Manual	1 pc
2	USB Interface Cable (UT362) only	1 pc
3	Software (UT362) only	1 pc
4	9V Battery Software	1 pc

In the event you find any missing or damaged item, please contact your dealer immediately.

#### Safety Information

In this manual, a **Warning** identifies conditions and actions that pose hazards to the user, or may damage the anemoscopes or the equipment under test.

A **Note** identifies the information that user should pay attention to.

#### Warning

To avoid possible electric shock or personal injury and to avoid possible damage to the anemoscopes or to the equipment under test, adhere to the following rules:

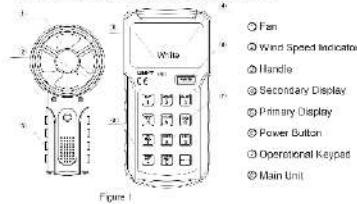
- Before using the anemoscopes inspect the case do not use the anemoscopes if it is damaged or the case (or part of the case) is removed. Look for cracks or missing plastic. Pay attention to the insulation around the connections.

- Do not touch the vane of the fan and the temperature sensor that are all sensitive parts of the anemoscope, for it may affect normal operation of the instrument.
- Replace the battery as soon as the battery indicator appears.
- If the anemoscope works abnormally, please stop using it and have it serviced by nearby service center.
- Do not use the anemoscopes in an environment of explosives, humidity, inflow modes. The performance of the anemoscopes may deteriorate after damaged.
- Use the specific authorized replacement part if you need to repair the anemoscopes.
- Do not use the anemoscope with the housing or cover opened.
- Note the battery "+" and "-" pole when installing the battery.

The following conditions or actions may cause damage to the anemoscopes, please take caution when using the anemoscopes.

- Select the appropriate wind speed before use, it may avoid overloading damage to the vane of the anemoscope fan(0-30m/s) under the unknown scenarios.
- Select the temperature measuring in 0°C to 40°C in order to avoid any fan damage caused by the high temperature.
- Do not try to recharge the battery.

#### The Anemoscope Structure (See Figure 1)



- ① Fan
- ② Wind Speed Indicator
- ③ Handle
- ④ Secondary Display
- ⑤ Primary Display
- ⑥ Power Button
- ⑦ Operatorial Keypad
- ⑧ Main Unit

Figure 1

#### Display Symbols (See Figure 2)



Figure 2

The table below offers information about the display symbols.

Number	Sign	Meaning
1	MAX	Display of Maximum Reading
2	MIN	Display of Minimum Reading
3		Data Hold is on
4	AVE	Display of Average Reading
5	READ	Reading Recorded Data is in Progress
6	REC NO	Recording Data Number
7	USB	USB is on
8	VEL	Air Velocity Measurement

9		The battery is Low
10		Secondary Data Display
11		Primary Data Display
12	ft/min	Air Velocity Unit - Feet Per Minute
13	m/s	Air Velocity Unit - Meter Per Second
14	°F/°C	Temperature Unit
15	CFM	Cubic Foot Per Minute
16	CMH	Cubic Meter Per Minute
17	KNOTS	Knots Per Hour
18	MPH	Miles Per Hour

#### Keypad Description (See Figure 3)

Function Key	Description
	Long press to power on; Short press to power off.
	To switch the units for air velocity and flow. In velocity mode, press the button to switch from m/s—ft/min—m/s—ft/min—m/s—ft/min units. In air flow mode, press to select between CFM and CMH units.

Figure 3

Function Key	Description
	In air velocity mode, it is used to switch from Max, Min to Real-time values; In air flow mode, it is used to switch from Max, Min, Average, 20% Max, and Real-time values; In setup status, it is to exit quickly.
	Press once to enter the Hold mode. Press it again to exit Hold mode. Long press press to open the backlight.
	To switch between air velocity and flow measurement modes. When viewing recorded data, it jumps on every 100 sets of data.
	Download data through USB port (For UT362 only).
	To switch from °F and °C temperature unit. When viewing data in the memory, it's used to obtain the first recorded data.
	Short press to record current measured reading; Long press to read the data in the memory.
	Press and hold the button while turning on the anemoscope, all recorded data in the memory will be cleared; When viewing the recorded data, it's used to subtract quickly.
	It is a functional menu button. Press and hold it to configure the anemoscope.
	In air flow mode, it's used to move the decimal point randomly when entering the Area value. START refers to decimal point after the first input digit, NEXT is to move the decimal point for next digit.
	To set up the Area in air flow mode.
	Confirmation key. See "Setting the Anemoscope".

Note: 0-9 numeric buttons are used to key in Area value settable within 0.000-9999 during air flow measurement.

**Setting the Anemoscope**

Under air velocity and flow mode, press and hold Button 9(MENU) to enter menu setup, press MENU to access next menu option.

**A. USB Setup**

Press Button 8 from USB0→USB1. The unit defaults at "USB0" every time at power-on status.

**B. Auto Power Off**

Press button 8 from AP00→AP01, the setting is saved even after power-off. The unit defaults at the saved setting when powering on, no need to reset again.

**C. Auto Record Interval**

Effective auto recording is settable within 0.5-255s, REC displays on upper part of LCD, and the lower part shows the set time (0.5-255). Press Button 2 to increment or long press to increment quickly; press Button 8 to decrement the time or long press to decrement quickly. The setting will be automatically saved after power off. The unit defaults at the set status and needs no resetting again.

**D. Resetting to Factory Default**

DEF flashes on LCD.

Press Button 2 to restore to factory settings: USB0, AP01,80s and clear all recorded data.

Press MENU to cancel factory settings and enter into air velocity measurement.

**Using the Anemoscope**

- Power On: Long press POWER button to turn on the Anemoscope.
- Select Air Velocity/Flow: Press VEL/FLOW button to switch between air velocity and air flow measurement.
- Data Hold: Press Hold to freeze the data, press again to disable the function.
- Select Air Velocity Units: Under air velocity mode, press UNIT button to switch from m/s→ft/m→m/s→km/h→mph units, press again to repeat.
- Select Air Flow Units: under air flow mode, press UNIT to switch from CMM→CFM units.

**• Key in Duct Area:**

1. To measure air flow, you need to input duct area first.
2. After entering air flow mode, the area is automatically set to 1.0 sq.m
3. Select a proper air flow unit, then press SAMPLE, LCD displays KEYIN and shows blank on upper part.
4. Key in 4-digit area data, gives it the format, then the numeric value shows on LCD.

**Examples:**

Enter 1, 0, 0, 0 Mean 1000 LCD display " 1000 "  
 Enter 1, -, 0, 0, 0 Mean 1.000 LCD display " 1.000 "  
 Enter 1, -, ENTET Mean 1.0 LCD display " 1.000 "  
 Enter 1, ENTET Mean 1 LCD display " 1.000 "  
 Enter 0, 0, 0, 1 Mean 0001 LCD display " 1.000 "  
 Enter -, 0, 0, 1 Mean .001 LCD display " 0.001 "  
 ---

For the same area value, it will probably have a different input methods but finally it has one display. Data Input Range: 0.000-9999

- Select Temperature Unit: Under air velocity mode, press T/°C to switch between °F and °C units
- Max. Air Velocity, Temp: Under air velocity mode, press MAX/MIN to switch from Normal to Max.
- Max. 2/3, AVG Air Flow: Under air flow mode, press MAX/MIN to switch from Normal →2/3→AVG.

**• Data Storage:**

1. If no data is saved, LCD displays "NO DATA";
2. If the memory is full, LCD shows "the clock", indicating no more data can be saved.
3. Manual Recording: Press Button 7 and the data displayed on LCD will be saved, accompanied by REC icon display. The REC icon disappears in 0.5s. Press Button 7 again to save to next location.
4. Auto Recording: Press Button 7, REC shows. Before the icon disappears, press again (two times) to enter auto mode which is accompanied by flashing REC icon, then the data will be recorded at a interval set previously. If the memory is full, the anemoscope exits the function automatically.

**5. Clear all data:**

Method 1: Press and hold Button 8 while turning on the anemoscope until CLR... shows on LCD.

Method 2: Reset to factory default (See "Setting the Anemoscope")

**• View Data:**

Under air velocity or flow mode, long press Button 7 to access READ function and automatically display the last recorded data. The upper part of

LCD shows the recording number or data, if it is RECNO, it represents the recording number; otherwise it is the recorded data.

1. Press Button 2 to increase the Record No., long press to increase quickly.
2. Press Button 8 to decrease the Record No., long press to decrease quickly.
3. Press Button 4 to increment 100 sets every time ( for large amount of recording), max. recorded data up to 2044.
4. Long press Button to exit READ function.

**Measuring Air Velocity (Air Temperature)(See Figure 4)**

Note: Place the anemoscope in the air with velocity above 10m/s for 1-2min before making the measurement.

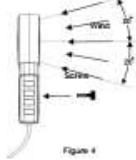


Figure 4

To carry out anemoscope, follow the following procedure:

1. Long press POWER button to turn on the anemoscope.
2. Press VEL/FLOW (Button 4) to set to VEL, accompanied by VEL or FLOW icon on LCD.
3. Press UNIT (Button 1) to select the velocity unit.
4. As shown in Figure 4, place the anemoscope in a direction as marked on inner side of the fan. And secure the handle with a screw (the user needs to buy the screw on his/her own).
5. Wait for 2 seconds for the anemoscope to stabilize the reading.
6. To obtain a accurate reading, please hold the anemoscope horizontally as in the Figure 4, the angle deviation should be <200.
7. The air temperature is also measured simultaneously in air velocity mode, the temperature shows on secondary display.
8. Press Button 8 to select °F / °C unit.
9. The primary display shows the velocity value.

**Computer Connectivity (For UT362 only)(See Figure 5)**

When the anemoscope (UT362) communicates with PC, use USB cable to connect the instrument to the USB port of PC. See Figure 5.

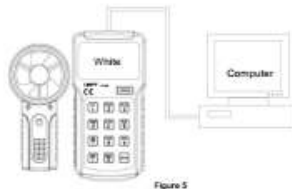


Figure 5

**Maintenance**

**A. General Service**

- 1) Periodically wipe the case with a damp cloth and mild detergent. Do not use abrasives or solvents.
- 2) Take out the battery when it is not using for a long time.
- 3) Do not use or store the Meter in a place of humidity, high temperature, explosive, inflammable and strong magnetic field.

**B. Replacing The Battery**

To avoid false reading, which could read to possible electronic shock or personal injury, replace the battery as soon as the battery indicator " " appears.

**To replace the battery**

- 1) Turn the anemoscope off and remove all the connectors from the input terminals.
- 2) Turn the anemoscope's front case down.
- 3) Remove the screw from the battery compartment and separate the battery compartment from the case bottom.
- 4) Take out the old battery and replace with a new 9V battery (6LF22)
- 5) Rejoin the case bottom and the battery compartment and reinstall the screw.

**C. Service And Repairing**

The Anemoscope is a highly intelligent and precision instrument and adopts auto calibration technique. Unless otherwise specified, do not replace all components randomly to avoid the accuracy bias.

Do not attempt to repair or service

your anemoscope unless you are qualified to do so and have the relevant calibration, performance test, and service information

**Technical Specification**

Function	Range	Accuracy
Air Velocity	2-10m/s	±(3%+0.5) ±(3%+0.5)
	10-30m/s	±(3%+0.8) ±(3%+0.8)
Air Flow	CMM	0.001-9999*100 √ √
	CFM	0.001-9999*100 √ √
Temperature	Main Unit Working Temp.	0°C ~40°C ±3°C ±3°C
	Sensor Working Temp.	32°F ~ 104°F ±4°F ±4°F
		0°C ~40°C ±3°C ±3°C
		32°F ~ 104°F ±4°F ±4°F

- Power: 9V 22 9V Battery
- Weight: 0.375kg
- Dimensions: 166mm(6.53")x34.4(W)mm
- Working Temperature: 0°C ~50°C (32°F ~122°F)
- Relative Humidity: 0-75%, non-condensing
- Storage Temperature: -20°C ~65°C (-4°F ~149°F)
- Air Pressure: 500mB ~2Bar

**CE Compliances:**

- EN61326:2006
- EN55022: 1998+A1+A2
- EN55024: 1998+A1+A2

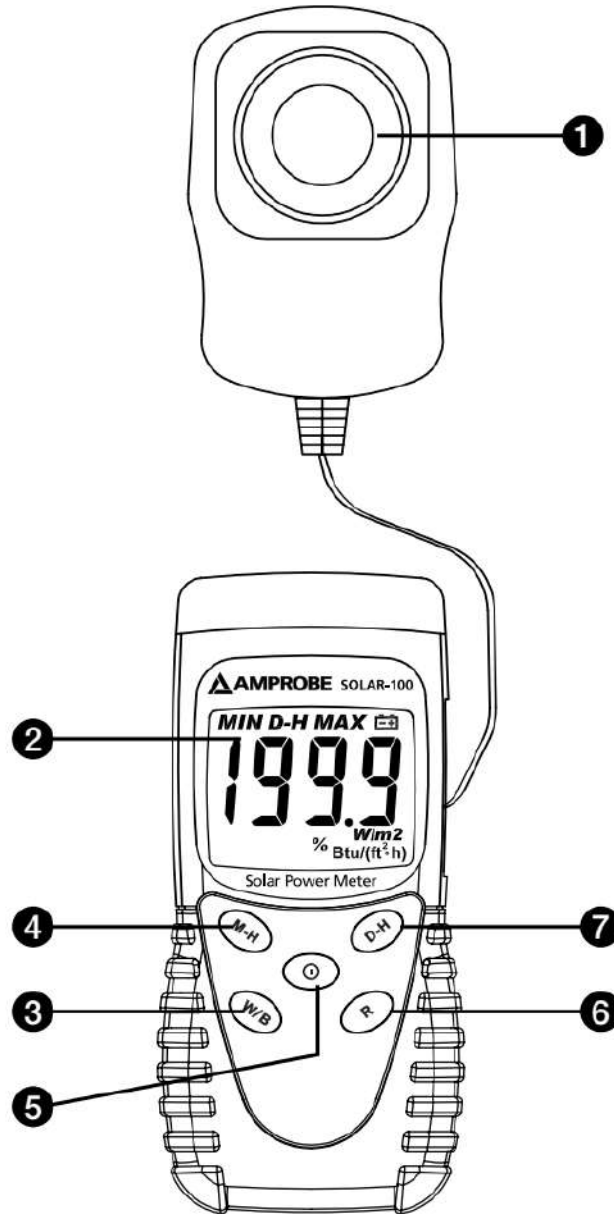
\*\* END \*\*

This operating manual is subject to change without notice.

**UNI-T**  
 UNI-TREND TECHNOLOGY (CHINA) CO., LTD.  
 No.1, Gong Ye Road, 1st Floor,  
 Binyuan Lane National High-Tech Industrial  
 Development Zone, Daxingmen City,  
 Guizhou Province, China  
 Tel: 86-901-8173-8888  
 Http: www.uni-t.com

بطاقة فنية حول جهاز قياس الاشعاع الشمسي Solarimeter:

## SOLAR-100 Solar Power Meter



- |                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| ① Light Sensor                   | ⑤ Power Button     |
| ② Display (LCD)                  | ⑥ Auto Range       |
| ③ W/m2/BTU (ft2*h) Switch Button | ⑦ Data Hold Button |
| ④ Lock Up Max/Min Button         |                    |



Contents lists available at ScienceDirect

## Desalination and Water Treatment

journal homepage: <https://www.sciencedirect.com/journal/desalination-and-water-treatment/>

## New design of solar still hybridized internally with solar collector to improve productivity

Yasmina Saada<sup>a</sup>, Zineb Korichi<sup>b,\*</sup>, Abdelkader Souigat<sup>b,✉</sup>, Driss Slimani<sup>b</sup>, Djamel Benmenine<sup>a</sup><sup>a</sup> Laboratory of New and Renewable Energy in Arid Zones, Kasdi merbah University, Ouargla, 30000, Algeria<sup>b</sup> École Normale Supérieure de Ouargla, Ouargla, 30000, Algeria

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Traditional solar still  
Solar collector  
The daily efficiency  
Exergy analysis

## ABSTRACT

This study presents the development and performance evaluation of an improved solar still incorporating a solar collector (metal plate) into a monoclinic solar still design. Comparative analysis was conducted between the improved system and a traditional solar still under identical operating conditions. The results demonstrate significant improvements in productivity and efficiency with the improved solar still. Specifically, the improved system achieved a cumulative productivity of 4.5 L/m<sup>2</sup>, representing a notable increase compared to the 2.9 L/m<sup>2</sup> produced by the traditional still. Moreover, the daily efficiency of the improved solar still reached 41%, substantially higher than the 26.7% efficiency of the traditional design. The enhancement rate of 55.17% underscores the considerable performance advancement attained with the upgraded solar still. These findings highlight the efficacy of integrating a solar collector into the monoclinic solar still design, offering promising prospects for improved solar desalination systems.

## 1. Introduction

Water is an essential resource for sustaining life on Earth, yet only a fraction of it is directly usable due to the salinity of seawater and contamination of freshwater sources [1]. The rising demand for clean water, driven by population growth, industrialization, and climate change, has intensified the need for effective desalination methods [2]. Among various approaches, solar distillation has emerged as an environmentally friendly and sustainable technique, aligning with global efforts to harness renewable energy sources [3].

Solar distillation involves using solar energy to purify water through a device known as a solar still (SS). This device converts sunlight into thermal energy, facilitating water purification via evaporation and condensation. Single slope solar stills are among the most popular designs due to their simplicity and affordability. Typically, these stills consist of a basin filled with saltwater, covered by a slanted glass lid. Sunlight penetrates the lid, heating the water and causing it to evaporate. The vapor condenses on the cooler surface of the glass and is collected as distilled water [4].

However, traditional solar stills are limited by low productivity, producing only a few liters of distilled water per square meter daily [5]. In response, recent studies have explored various design modifications to enhance efficiency. For example, reducing the water depth in the basin has been shown to improve evaporation rates [6,7], while optimizing the tilt angle of the glass cover enhances condensation, both

of which contribute to higher water yields [8]. Researchers have also incorporated advanced materials to improve thermal performance. The use of nanofluids [9–11] and phase change materials (PCM) [12,13] increases heat absorption and retention, further enhancing productivity by promoting consistent heat transfer within the still (see Fig. 1).

Beyond material enhancements, another prominent approach to improve productivity has involved integrating external solar collectors with the distillers. These external collectors—such as flat plate collectors [14], parabolic concentrators [15–18],—are designed to capture additional solar energy and transfer it to the water in the still, effectively increasing evaporation rates and boosting distilled water output. While these integrations have shown considerable promise in increasing productivity, they introduce several disadvantages. The added components increase the complexity of the solar still, often requiring more maintenance due to exposure and wear. Additionally, external collectors elevate material and operational costs, which can limit the feasibility of solar stills in resource-constrained settings. External collectors can also result in unintended heat losses, as energy must be transferred across multiple components rather than being contained within a single, cohesive system.

Given these challenges, the need for a simplified, cost-effective solution is evident. To address the limitations of external collectors and auxiliary systems, this study presents a novel approach that integrates

\* Corresponding author.

E-mail address: [Zinebkorichid02@gmail.com](mailto:Zinebkorichid02@gmail.com) (Z. Korichi).<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100959>

Received 13 March 2024; Received in revised form 25 November 2024; Accepted 13 December 2024

Available online 19 December 2024

1944-3986/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



Contents lists available at ScienceDirect  
**Energy**  
 journal homepage: [www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy)



## Experimental investigation of solar desalination in Algeria: Performance, economic feasibility, and climatic variability analysis of geothermal-integrated and glass-cooled solar stills

Yasmina Saada<sup>a,b,\*</sup>, Djamel Benmenine<sup>c,b</sup>, Belkhir Settou<sup>d,e</sup>, Zineb Korichi<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Department of Physic, University of Kasdi Merbah Ouargla, BP 511, Ouargla, 30000, Algeria  
<sup>b</sup> Laboratory of New and Renewable Energy in Arid Zones, Kasdi Merbah University, Ouargla, 30000, Algeria  
<sup>c</sup> Department of Renewable Energy, University of Kasdi Merbah Ouargla, BP 511, Ouargla, 30000, Algeria  
<sup>d</sup> Institute of Technology, University of Kasdi Merbah Ouargla, BP 511, Ouargla, 30000, Algeria  
<sup>e</sup> Process Engineering Laboratory (PEL), Kasdi Merbah University of Ouargla, BP 511, Ouargla, 30000, Algeria  
<sup>f</sup> Ecole Normale Supérieure de Ouargla, Ouargla, 30000, Algeria

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
 Solar desalination  
 Geothermal integration  
 Climatic variability  
 Glass cooling  
 Economic analysis

### ABSTRACT

This study investigates the performance of three solar still configurations: Traditional Solar Still (TSS), Modified Solar Still 1 (MSS-1) with geothermal integration, and Modified Solar Still 2 (MSS-2) with a glass-cleaning mechanism, under three distinct weather conditions: clear and stable, intermittent solar and wind variability, and high wind influence with solar fluctuations. Experimental results show that MSS-1 outperformed the other systems, achieving the highest daily freshwater productivity of 4.17 L/m<sup>2</sup>, compared to 3.08 L/m<sup>2</sup> for MSS-2 and 2.89 L/m<sup>2</sup> for TSS. Under fluctuating solar conditions, MSS-1 recorded a peak energy efficiency of 43.67 %, surpassing MSS-2 (36.96 %) and TSS (32.48 %), with exergy efficiency of 4.24 %, compared to 1.41 % for MSS-2 and 1.39 % for TSS. The economic analysis revealed that MSS-1 had the lowest cost per liter (CPL) at \$0.0091/L and a payback period of 70.67 days, outpacing TSS (\$0.0101/L, 78.25 days) and MSS-2 (\$0.0104/L, 73.24 days). Furthermore, incorporating real climatic data for 8760 h revealed that 75 % of the year is favorable, improving the accuracy of long-term productivity forecasts. MSS-1 achieved an annual water yield of 1522.37 L/m<sup>2</sup>, compared to 1055.37 L/m<sup>2</sup> for TSS and 1127.57 L/m<sup>2</sup> for MSS-2. These findings highlight the significance of considering real-world weather conditions in solar desalination design to improve efficiency, economic feasibility, and reliability.

### Nomenclature

TSS	Traditional Solar Still	
MSS-1	Modified Solar Still 1	
MSS-2	Modified Solar Still 2	
$T_w$	Temperate of water	K
$T_g$	Temperate of glass	K
$T_{amb}$	Temperate of ambient	K
$T_s$	Temperate of sun	K
$T_{avg}$	Average temperature	K
$m_w$	Quantity of distilled water	$\left(\frac{kg}{h \cdot m^2}\right)$

(continued on next column)

### (continued)

$J_r$	Latent heat of vaporization	$\left(\frac{J}{kg}\right)$
$q_{v,w-g}$	Heat transferred for vaporization between water and glass	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
$h_{e,w-g}$	Heat transfer coefficient by evaporation between water and glass	$\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$
$h_{c,w-g}$	Heat transfer coefficient by convection between water and glass	$\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$
$P_w$	Vapor pressure for temperature $T_w$	$\left(\frac{N}{m^2}\right)$
$P_g$	Vapor pressure for temperature $T_g$	$\left(\frac{N}{m^2}\right)$
$I$	Solar irradiance	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$

(continued on next page)

\* Corresponding author. Department of Physic, University of Kasdi Merbah Ouargla, BP 511, Ouargla, 30000, Algeria  
 E-mail address: [saada.yasmina@univ-ouargla.dz](mailto:saada.yasmina@univ-ouargla.dz) (Y. Saada).

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136875>

Received 20 March 2025; Received in revised form 30 April 2025; Accepted 28 May 2025

Available online 3 June 2025

0360-5442/© 2025 Elsevier Ltd. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.



Renewable Energy development unit in Arid Zones  
**UDERZA**  
وحدة تطوير الطاقات المتجددة في المناطق القاحلة

**جامعة الشهيد حماد لخضر - الوادي**  
Echahid Hamma Lakhdar University- El Oued  
وحدة البحث تطوير الطاقات المتجددة في المناطق القاحلة  
Renewable Energy development unit in Arid Zones  
**كلية التكنولوجيا**  
Faculty of Technology



جامعة الشهيد حماد لخضر - الوادي  
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

## First International Conference for Renewable Energies and Their Applications (1<sup>st</sup> ICERA-2023)

# Certificate of Participation

*This is to certify that **Benmenine Djamel** presented a Poster presentation at the 1st ICERA-2023*

*the paper entitled*

**Etude d'amélioration de la performance énergétique d'un distillateur solaire dans la région de ouargla**

**Co-Authors:** Saada yasmına, Korichi zineb, Mezabia mohamed Fadel, Zerrouki abdelaziz, Tekha mohamed

El-Oued - 2023  
1st ICERA-2023 General Chair  
**OUCIF KHALED MOHAMMED TAYEB**




المخلص

## دراسة تأثير مختلف أنواع التهجين على أداء المقطر الشمسي في منطقة ورقلة

### الملخص

لمعالجة إشكالية ندرة المياه في المناطق الجافة وشبه جافة من خلال دراسة أداء المقطر الشمسي وإمكانية تحسينه باستخدام تقنيات هجينة في منطقة ورقلة كدراسة حالة ذات المناخ الحار والجاف، أُجريت تجربتان ميدانيتان لتحسين أداء المقطر الشمسي باستخدام تقنيات هجينة، إلى جانب توظيف الذكاء الاصطناعي في تحليل النتائج والتنبؤ بالإنتاجية. في التجربة الأولى، أُضيفت لوحة معدنية داخلية عملت كمتص وموزع حراري، مما رفع الإنتاجية اليومية من 2.9 إلى 4.5 لتر/م<sup>2</sup> وزاد الكفاءة الحرارية من 26.7% إلى 41%. أما التجربة الثانية، فقد قارنت بين ثلاثة نماذج: المقطر التقليدي (TSS)، المقطر المحسن بالمياه الجوفية (MSS-1)، والمقطن المحسن بنظام تبريد للغطاء (MSS-2). وأظهرت النتائج تفوق MSS-1 بإنتاجية قصوى بلغت 4.17 لتر/م<sup>2</sup>، وأفضل أداء اقتصادي (0.0091 دولار/لتر) مع فترة استرداد لا تتجاوز 70.7 يوماً، متفوقاً على MSS-2 وTSS. استناداً إلى نتائج التجارب، استُخدمت خمسة نماذج من التعلّم الآلي، حيث تميز نموذج Support vector machine في التجربة الأولى بدقة عالية، بينما حقق نموذج Random Forest في التجربة الثانية أفضل أداء (R ≈ 0.997) مع أقل مستويات للخطأ. وتبرز هذه الدراسة أن الجمع بين التحسينات الهندسية، والتكامل الحراري، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي يفتح آفاقاً واعدة لتطوير مقطرات شمسية أكثر كفاءة واستدامة في البيئات الحارة والجافة.

الكلمات المفتاحية: المقطر الشمسي ; التهجين ; التحسين ; الحرارة الجوفية ; الدراسة التجريبية ; الكفاءة الحرارية ; الذكاء الاصطناعي

## Study of the Effect of Different Types of Hybridization on the Performance of a Solar Still in the Ouargla Region

### Abstract

To address the issue of water scarcity in arid and semi-arid regions, the performance of a solar still and its potential improvement through hybrid techniques were investigated, taking Ouargla (characterized by a hot and dry climate) as a case study. Two field experiments were carried out to enhance the efficiency of the solar still using hybrid approaches, in parallel with the application of artificial intelligence for analyzing the results and predicting productivity. In the **first experiment**, an internal metallic plate was integrated to act as an absorber and heat distributor, which increased the daily yield from 2.9 to 4.5 L/m<sup>2</sup> and improved thermal efficiency from 26.7% to 41%. The **second experiment** compared three configurations: the traditional solar still (TSS), the still

enhanced with a geothermal water heat exchanger (MSS-1), and the still improved with a glass cover cooling system (MSS-2). The results demonstrated the superiority of MSS-1, achieving a maximum daily yield of 4.17 L/m<sup>2</sup> and the best economic performance (0.0091 USD/L) with a payback period not exceeding 70.7 days, outperforming both MSS-2 and TSS. Based on the experimental results, five **machine learning models** were applied. The Support Vector Machine model exhibited high accuracy in the first experiment, while the Random Forest model achieved the best performance in the second experiment ( $R \approx 0.997$ ) with the lowest error metrics. This study highlights that combining engineering improvements, thermal hybridization, and artificial intelligence applications provides a promising pathway for developing more efficient and sustainable solar stills adapted to hot and dry environments.

**Keywords:** Solar still; Hybridization; Improvement; Geothermal heat; Experimental study; Thermal efficiency; Artificial intelligence.